

ISSN (print) 2413-8959
ISSN (online) 2786-9490

Техніка будівництва

Збірник наукових праць



Construction Engineering

Collection of scientific works

43, 2025

Construction Engineering

Техніка будівництва

Collection of
scientific works

Збірник
наукових праць

Issue 43

Випуск 43

2025

2025

Published since 1997

Видається з 1997 року

Kyiv National
University of Construction
and Architecture

Київський національний
університет будівництва і
архітектури

ISSN (print) 2413-8959
ISSN (online) 2786-9490

Видається з 1997 р. двічі на рік

Засновник: Київський національний університет будівництва і архітектури

Збірник наукових праць «Техніка будівництва» зареєстровано в Національній раді України з питань телебачення і радіомовлення, рішення №223 від 01.02.2024 р.

Ідентифікатор медіа: R30-02587 (реєстрація суб'єктів у сфері медіа).

Видання внесено до Категорії Б «Переліку наукових фахових видань України» наказом Міністерства освіти і науки України №582 від 24.04.2024 р.

Головний редактор: Назаренко І.І., д-р техн. наук, проф.

Заступник головного редактора: Дедов О.П., д-р техн. наук, доц.

Відповідальний секретар: Міщук Є.О., к-т техн. наук, доц.

Редакційна колегія:

Кузьмінець М.П., д-р техн. наук, проф. (м. Київ, Україна);

Саленко Ю.С., д-р техн. наук, проф. (м. Кременчук, Україна);

Кравець С.В., д-р техн. наук, проф. (м. Рівне, Україна);

Почка К.І., д-р техн. наук, проф. (м. Київ, Україна);

Волошкіна О.С., д-р техн. наук, проф. (м. Київ, Україна);

Кривомаз Т.І., д-р техн. наук, проф. (м. Київ, Україна);

Шаманський С.И., д-р техн. наук, проф. (м. Київ, Україна);

Ткаченко Т.М., д-р техн. наук, проф. (м. Київ, Україна);

Ужма Адам, д-р техн. наук, доц. (м. Ченстохова, Польща);

Левченко Л.О., д-р техн. наук, проф. (м. Київ, Україна);

Тихенко О.М., д-р техн. наук, проф. (м. Київ, Україна).

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури, протокол № 39 від 25.12.2025 р.

Усі права застережені. Відповідальність за зміст та достовірність наведених даних несуть автори публікацій.

Адреса редакції: 03037, м. Київ, просп. Повітряних сил, 31, кім.603А.
тел. +38 044 241-5548, e-mail: tehbud@knuba.edu.ua

Редактор *Дьяченко О.С.*

Комп'ютерна верстка *Міщук Є.О.*

У збірнику публікуються результати теоретичних і прикладних наукових досліджень, а також конструкторських робіт в галузі будівництва та будівельної техніки

Мова видання: українська, англійська

© Київський національний університет будівництва і архітектури, 2025

ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ	4
Микола Пристайло, Ігор Гонга Побудова фізичної моделі для дослідження різання ґрунтів наконечником з динамічною ріжучою кромкою на пневмоаккумуляторі	4
Володимир Кулай, Олексій Васильєв Дослідження енерговитрат установки для приготування ніздрюватих бетонів в залежності від форми робочих органів	15
Віктор Нечипорук, Сергій Орищенко Сучасні методи діагностики машин	23
Ivan Nazarenko, Yevhen Mishchuk, Petro Ladkin Modeling the failure process of materials with different physical and mechanical properties under static loading conditions	36
Наталія Сорокова, Юлія Кольчик, Лариса Пашкова, Володимир Новіков, Наталія Чепурна Обладнання видобутку, підготовки, транспортування та зберігання нафти і газу	48
Лариса Пашкова, Володимир Новіков, Наталія Чепурна, Олександр Погосов, Михайло Кириченко Інтерперетація геології нафтогазових покладів на основі сейсмічних даних	55
Вадим Михайлик Дослідження потоку розчину у робочій камері та клапанних вузлах під час роботи розчинонасоса	63
Микола Клименко, Ігор Косминський, Олександр Дьяченко, Олексій Погребач Інтеграція метрологічного підтвердження та технічної діагностики у концепцію цифрових двійників для забезпечення якості технологічного обладнання	76
Олександр Панфілов, Микола Нестеренко Аналітичне обґрунтування імпульсно-вібраційного доущільнення бетонних сумішей із використанням безінерційного переважувача	83
Максим Пирлик, Микола Нестеренко Аналітичне обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача для доущільнення бетонних сумішей	92
Тетяна Нестеренко, Юрій Тікан Оптимізація геометричних параметрів вібраційних транспортерів з нелінійними пружними зв'язками	98
Денис Сідан, Тетяна Нестеренко Аналітико-експериментальний підбір конструкції шнека екструдера для адитивного формування будівельних конструкцій	104
ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	123
Ірина Кордуба, Альона Перебинос Застосування плазмохімічних методів для екологічно безпечного оброблення медичних і фармацевтичних відходів	123
Роман Гамоцький Технічні рішення забезпечення енергетичної стійкості будівель та громад під час війни	132
Артем Циба Вибір технологій відбудови житлового фонду на основі екологічних, соціальних та управлінських критеріїв	143
Олена Жукова, Павло Старжинський Визначення основних умов та факторів трансформації водних об'єктів в умовах міського середовища	151

Галузеве машинобудування

УДК 621.878.23:681.3

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0601>**¹Микола Пристайло,**кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних машин, <https://orcid.org/0000-0003-3151-4680>,
e-mail: prystailo.mo@knuba.edu.ua**¹Ігор Гонта,**аспірант кафедри будівельних машин, <https://orcid.org/0009-0002-4441-8049>,
e-mail: honta_ip-2022@knuba.edu.ua¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ПОБУДОВА ФІЗЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗАННЯ ГРУНТІВ НАКОНЕЧНИКОМ З ДИНАМІЧНОЮ РІЖУЧОЮ КРОМКОЮ НА ПНЕВМОАКУМУЛЯТОРІ

АНОТАЦІЯ. У даній роботі розглянуто створення фізичної моделі установки для різання ґрунтів наконечником з динамічною ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі для проведення експериментальних досліджень. З метою дослідження процесу взаємодії робочого органу з робочим середовищем виникає необхідність проведення експериментальних досліджень, для яких, як правило, використовуються натурні об'єкти дослідження або їх моделі. При фізичному моделюванні зберігається фізична природа явищ, але змінюється їх масштаб. Використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання, визначено умови подібності установки для різання ґрунтів наконечником з динамічною ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі, в якій взаємодія робочого органу та робочого середовища описується силовим рівнянням із врахуванням їх параметрів. При цьому параметри натурального процесу взаємодії робочого органу та робочого середовища записано через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності. В результаті ділення відповідних доданків силових рівнянь натурної установки та моделі між собою отримано систему з п'яти рівнянь, яка зв'язує між собою сімнадцять невідомих величин коефіцієнтів подібності. Дванадцять з цих величин було задано з конструктивних міркувань, а п'яти коефіцієнтів розраховано.

Отримані значення коефіцієнтів подібності дали можливість побудувати фізичну модель установки для різання ґрунтів наконечником з динамічною ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі, що подібна натуральному робочому органу розпушника установці для різання ґрунтів. В якості фізичної моделі установки з врахуванням коефіцієнтів подібності та передбачених задач досліджень було доопрацьовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА для дослідження процесу різання ґрунтів, що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання. В якості робочого середовища запропоновано використання парафін виходячи з його оптичних властивостей під навантаженням.

Ключові слова: установка, фізична модель, різання, робочий орган, середовище, моделювання, коефіцієнти подібності, наконечник, динамічна ріжуча кромка, пневмоакумулятор.

CONSTRUCTION OF A PHYSICAL MODEL FOR RESEARCHING SOIL CUTTING WITH A TIP WITH A DYNAMIC CUTTING EDGE ON A PNEUMATIC ACCUMULATOR

ABSTRACT. This paper considers the creation of a physical model of a soil cutting device with a tip with a dynamic cutting edge on a pneumatic accumulator for conducting experimental studies. In order to study the process of interaction of the working body with the working environment, it is necessary to conduct experimental studies, for which, as a rule, full-scale research objects or their models are used. In physical modeling, the physical nature of phenomena is preserved, but their scale changes. Using the similarity theorem and physical modeling, the similarity conditions of the soil cutting device with a tip with a dynamic cutting edge on a pneumatic accumulator were determined, in which the interaction of the working body and the working medium is described by a force equation taking into account their parameters. In this case, the

parameters of the natural process of interaction between the working body and the working environment are recorded through the parameters of the physical model and similarity coefficients. As a result of dividing the corresponding terms of the force equations of the full-scale installation and the model, a system of five equations was obtained, which connects seventeen unknown values of the similarity coefficients. Twelve of these values were given for design reasons, and five coefficients were calculated.

The obtained values of the similarity coefficients made it possible to build a physical model of a soil cutting device with a tip with a dynamic cutting edge on a pneumatic accumulator, which is similar to the natural working body of a soil cutting device. The use of paraffin as a working medium is proposed based on its optical properties under load.

Keywords: *installation, physical model, cutting, working body, environment, modeling, similarity coefficients, tip, dynamic cutting edge, pneumatic accumulator.*

1. Постановка проблеми. З метою перевірки адекватності теоретичних досліджень проводяться експериментальні дослідження з наступним порівняльним аналізом результатів отриманих в процесі теоретичних і експериментальних досліджень.

Моделювання процесів різання ґрунтів є одним із ключових напрямів сучасних досліджень у будівельній, сільськогосподарській та гірничій галузях. Воно дає змогу системно вивчати взаємодію робочих органів землерийних машин з ґрунтовим середовищем, що у реальних умовах часто є надзвичайно складним і ресурсоємним завданням. Завдяки моделюванню можна відтворювати різноманітні сценарії роботи техніки, аналізувати фактори, що впливають на процес різання, та отримувати результати з високим рівнем точності без проведення численних натурних випробувань.

Основна мета такого моделювання полягає у визначенні силових та енергетичних характеристик процесу, серед яких: сила опору ґрунту, вплив швидкості руху та глибини різання, геометрія та форма ріжучого інструмента. Важливим завданням є також дослідження динаміки взаємодії робочого органу з ґрунтом, де враховуються інерційні сили, коливання та удари, які істотно впливають на ефективність і довговічність обладнання.

Особливе значення має можливість відтворювати процеси деформації, руйнування і переміщення ґрунту. Це досягається завдяки використанню різних підходів:

- математичного моделювання, що базується на рівняннях механіки суцільного середовища та емпіричних залежностях;
- чисельного моделювання (метод скінченних елементів, метод дискретних елементів), яке дає змогу враховувати особливості структури ґрунту, зокрема його вологість, щільність, кут внутрішнього тертя та когезію;
- фізичного моделювання у лабораторних умовах, коли створюються спрощені аналоги реальних процесів для підтвердження достовірності обчислювальних моделей.

Результати моделювання мають широкий спектр практичного застосування. Вони дозволяють оптимізувати форму та кут установки робочих органів, мінімізувати витрати енергії на різання ґрунту, підвищити продуктивність машин, а також забезпечити їхню універсальність у різних типах ґрунтів — від легких піщаних до важких глинистих. Крім того, моделі використовуються для оцінки зносу ріжучих елементів, прогнозування їхнього ресурсу та розробки конструкцій із підвищеною довговічністю.

Не менш важливою перевагою моделювання є можливість прогнозування роботи техніки в екстремальних умовах, де проведення реального експерименту є ускладненим або навіть небезпечним. Це стосується, наприклад, досліджень у мерзлих ґрунтах, у зонах підвищеної вологості чи при роботі під великим тиском.

Отже, моделювання процесів різання ґрунтів виступає потужним науковим і практичним інструментом, що поєднує аналітичну точність, економічну ефективність та безпечність. Воно дозволяє не лише глибше зрозуміти механіку ґрунтових процесів, але й забезпечує створення інноваційних технічних рішень для сучасної будівельної та землерийної техніки [1].

В наш час створення натурального робочого органу з метою проведення експериментальних досліджень привело б до значної затрати часу та коштів. Враховуючи це, постає задача створення фізичної моделі і проведення на ній повноцінних експериментальних досліджень.

2. Аналіз останніх досліджень. Фізичне моделювання зберігає фізичну природу явищ, але змінює їх масштаб. Сенс фізичного моделювання полягає в тому, щоб за результатами дослідів на моделях можна було достовірно оцінити характер ефектів і кількісні взаємозв'язки між величинами, які визначають фізично подібні явища в натурних умовах [2].

В основу фізичного моделювання закладено теорію подібності [3], що опирається на аналіз розмірностей, а саме: об'єкти є подібними, якщо у відповідні моменти часу у відповідних точках об'єктів значення змінних величин, що характеризують стан одного об'єкта (натури), пропорційні відповідним значенням величин іншого об'єкта (моделі). В подібних об'єктах характеристики натурного об'єкта можуть бути отримані простим перерахунком із характеристик модельного об'єкта, що визначається експериментально. Для всіх величин відповідної розмірності таким множником є коефіцієнт подібності.

У дослідженнях процесів різання ґрунтів критерії подібності відіграють ключову роль, оскільки дозволяють переносити результати, отримані на лабораторних моделях або в комп'ютерних симуляціях, на реальні машини та механізми. Подібність означає, що модель і натурний об'єкт мають однакові закономірності поведінки, навіть якщо відрізняються масштабом чи умовами дослідження.

Для забезпечення коректності моделювання у ґрунтомеханіці розглядають три основні рівні подібності:

- **геометрична подібність** — модель робочого органу та зони різання повинна зберігати пропорції щодо реальних конструкцій;
- **кінематична подібність** — відношення швидкостей і прискорень руху інструмента у моделі й у натурних умовах має збігатися;
- **динамічна подібність** — співвідношення сил, що діють під час різання (інерційних, гравітаційних, сил тертя та опору ґрунту), повинно залишатися однаковим.

У практиці досліджень процесів різання ґрунтів використовують різні критерії подібності, серед яких:

- **число Фруда (Fr)** — відображає співвідношення сил інерції та сили тяжіння, важливе для оцінки руху ґрунтових мас;
- **число Рейнольдса (Re)** — характеризує співвідношення сил інерції й в'язкості, що впливає на поведінку ґрунту при різних швидкостях;
- **число Кулона (Cu)** — відношення сил зчеплення ґрунту до нормального тиску, яке визначає умови його руйнування;
- **відносна глибина різання (h/l)** — співвідношення між глибиною занурення інструмента та його характерним розміром, що впливає на величину опору.

Дотримання критеріїв подібності під час моделювання дозволяє:

1. Отримувати результати, що адекватно відображають поведінку ґрунту при роботі реальних машин.
2. Зменшити кількість дорогих натурних експериментів.
3. Прогнозувати енергетичні витрати на різання ґрунтів у різних умовах.
4. Оптимізувати конструкцію робочих органів землерийної техніки ще на етапі проєктування.

Таким чином, критерії подібності є науковою основою, яка забезпечує правильність перенесення результатів з моделі на реальний об'єкт і підвищує ефективність досліджень у галузі механіки ґрунтів та будівельної техніки.

В якості критеріїв подібності для побудови фізичної моделі використовуються безрозмірні комплекси, які являють собою відношення відповідних складових рівнянь взаємодії робочого органу з середовищем реального об'єкта і моделі [4].

Отже, методологія моделювання робочих процесів різання ґрунтів наконечником з ДРКП базується на теорії подібності.

Умови фізичного моделювання робочого процесу різання ґрунтів наконечник з ДРКП [5-7] передбачають, що: визначаючі критерії подібності різання ґрунтів для моделі і оригіналу повинні бути однаковими; однойменні фізичні параметри рівнянь, що описують робочий процес, складених для моделі і оригіналу, повинні бути відповідно пропорційними; процес взаємодії наконечника з ДРКП з середовищем в моделі і оригіналі повинен належати до одного класу явищ і описуватися однаковою системою рівнянь; модель і оригінал наконечника з ДРКП і системи в цілому повинні бути геометрично подібні; початкові умови, що характеризують робочий процес в моделі, повинні бути подібні відповідним умовам оригіналу; граничні умови моделі повинні бути подібні граничним умовам оригіналу.

3. Мета роботи. Визначення параметрів та побудова фізичної моделі установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП.

4. Виклад основного матеріалу. На рис. 1 та 2 представлено бульдозер з розпушником наконечник якого обладнаний ДРКП [8], що складається з базової машини бульдозерного та розпушувального обладнання. На стійці розпушника 1, встановлено наконечник 2, динамічну ріжучу кромку 3, з пневмоакумулятором 4.

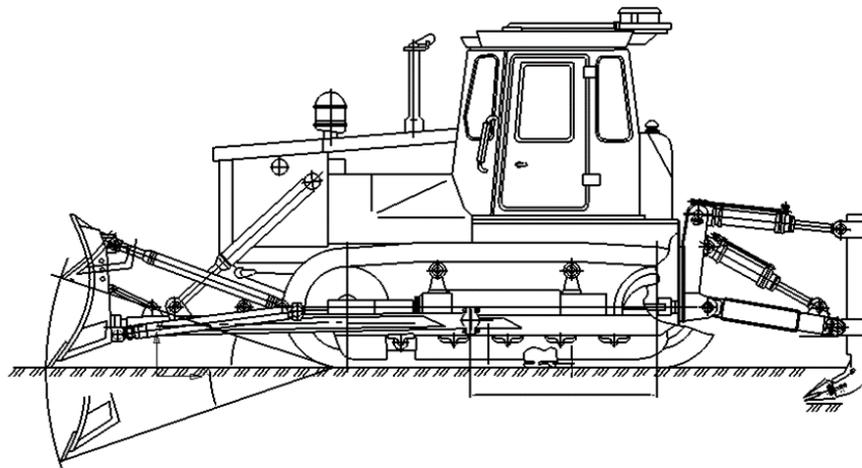


Рис.1. Бульдозер з розпушником, наконечник якого обладнаний ДРКП
Fig. 1. Bulldozer with a tiller tip equipped with a DRKP

Така конструкція забезпечує накопичення потенціальної енергії під час зминання ґрунту з її подальшим перетворенням у кінетичну та спрямуванням у масив ґрунту в оптимальний момент часу [9].

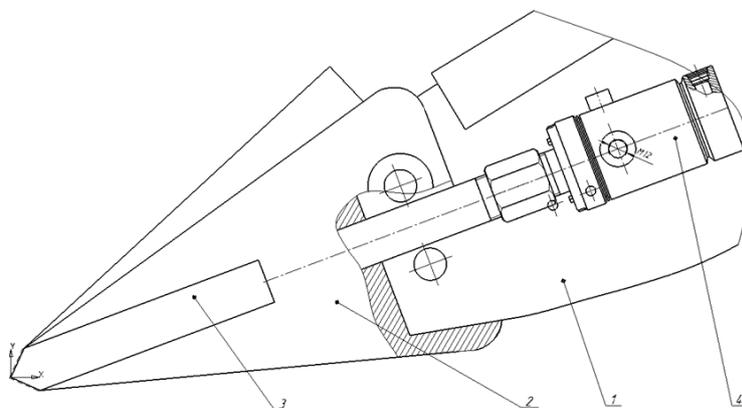


Рис.2. Наконечник розпушника, який обладнаний ДРКП
Fig. 2. The tip of the tiller equipped with a DRKP

Використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання [10], визначено умови подібності установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП, в якій взаємодія робочого органу та робочого середовища описується рівнянням [11]:

$$P_S = m_f H b_k + 2m_{si} H^2 + 2m_{si.c} H - \left(\frac{u k_D S_{pic}}{2V_{pic} k_\alpha} - E_A \Delta x D_c \sin \lambda \right) \frac{l}{l_c} l_{pic} \sin \lambda, \quad (1)$$

де m_f – питома сила різання для подолання опору ґрунту передньою гранню наконечника при куті різання 45° ; H – глибина різання, м; b_k – ширина наконечника; $m_{si}, m_{si.c}$ – коефіцієнти, що характеризують питомі сили опору ґрунту руйнуванню в бічних розширеннях і зрізу бічними ребрами ножа; k_D – питомий опір ґрунту динамічному руйнуванню; V_{pic} – швидкість впровадження; u – швидкість розповсюдження хвилі деформації в масиві ґрунту; k_α – коефіцієнт кута загострення; E_A – відповідно модуль деформації повітря та ґрунту; Δx – переміщення ДРКП; D_c – діаметр пневмоакумулятора; l_{pic} – довжина стисненої зони ґрунту внаслідок навантаження в зоні ДРКП; l_c – довжина сколу елемента ґрунту; λ – задній кут наконечника.

Площу контакту можна представити через добуток ширини наконечника та висоти ДРКП:

$$S_{pic} = b_k h_{pic}. \quad (2)$$

Тоді вираз (1) набере вигляду:

$$P_S = m_f H b_k + 2m_{si} H^2 + 2m_{si.c} H - \frac{u \cdot k_D \cdot b_k \cdot h_{pic} \cdot l_{pic}}{2 \cdot V_{pic} \cdot k_\alpha \cdot l_c} \sin \lambda + \frac{E_A \cdot \Delta x \cdot D_c \cdot l_{pic}}{l_c} \sin^2 \lambda, \quad (3)$$

Для виконання умов подібності процесів, що відбуваються при взаємодії з середовищем фізичної моделі оригіналу робочого органу необхідне дотримання рівності геометричних і динамічних критеріїв подібності [12]. При цьому параметри натурального процесу взаємодії робочого органу та робочого середовища записано через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності (таблиця 1):

- параметри натурального процесу взаємодії робочого органу та робочого середовища записано через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності:

$$\begin{aligned} P_{S_H} &= \delta_{P_S} \cdot P_{S_M}, m_{f_H} = \delta_{m_f} \cdot m_{f_M}, m_{si_H} = \delta_{m_{si}} \cdot m_{si_M}, m_{si.c_H} = \delta_{m_{si.c}} \cdot m_{si.c_M}, H_H = \delta_H \cdot H_M, b_{k_H} = \delta_{b_k} \cdot b_{k_M}, \\ k_{D_H} &= \delta_{k_D} \cdot k_{D_M}, k_{\alpha_H} = \delta_{k_\alpha} \cdot k_{\alpha_M}, h_{pic_H} = \delta_{h_{pic}} \cdot h_{pic_M}, V_{pic_H} = \delta_{V_{pic}} \cdot V_{pic_M}, l_{pic_H} = \delta_{l_{pic}} \cdot l_{pic_M}, \\ l_{c_H} &= \delta_{l_c} \cdot l_{c_M}, u_H = \delta_u \cdot u_M, E_{A_H} = \delta_{E_A} \cdot E_{A_M}, D_{c_H} = \delta_{D_c} \cdot D_{c_M}, \Delta x_H = \delta_{\Delta x} \cdot \Delta x_M, \lambda_H = \delta_\lambda \cdot \lambda_M \end{aligned} \quad (4)$$

- параметри натурної установки:

$$P_{S_H}, m_{f_H}, m_{si_H}, m_{si.c_H}, H_H, b_{k_H}, k_{D_H}, k_{\alpha_H}, h_{pic_H}, V_{pic_H}, l_{pic_H}, l_{c_H}, u_H, E_{A_H}, D_{c_H}, \Delta x_H, \lambda_H$$

- параметри фізичної моделі:

$$P_{S_M}, m_{f_M}, m_{si_M}, m_{si.c_M}, H_M, b_{k_M}, k_{D_M}, k_{\alpha_M}, h_{pic_M}, V_{pic_M}, l_{pic_M}, l_{c_M}, u_M, E_{A_M}, D_{c_M}, \Delta x_M, \lambda_M$$

- відповідні коефіцієнти подібності [13]:

$$\delta_{P_S}, \delta_{m_f}, \delta_{m_{si}}, \delta_{m_{si.c}}, \delta_H, \delta_{b_k}, \delta_{k_D}, \delta_{k_\alpha}, \delta_{h_{pic}}, \delta_{V_{pic}}, \delta_{l_{pic}}, \delta_{l_c}, \delta_u, \delta_{E_A}, \delta_{D_c}, \delta_{\Delta x}, \delta_\lambda$$

Тоді можна записати рівняння, подібні рівнянню (3), для натурної установки та її моделі, які мають вигляд:

$$\begin{aligned} P_{S_H} &= m_{f_H} H_H b_{k_H} + 2m_{si_H} H_H^2 + 2m_{si.c_H} H_H - \\ &- \frac{u_H \cdot k_{D_H} \cdot b_{k_H} \cdot h_{pic_H} \cdot l_{pic_H}}{2 \cdot V_{pic_H} \cdot k_{\alpha_H} \cdot l_{c_H}} \sin \lambda_H + \frac{E_{A_H} \cdot \Delta x_H \cdot D_{c_H} \cdot l_{pic_H}}{l_{c_H}} \sin^2 \lambda_H, \end{aligned} \quad (5)$$

$$P_{S_M} = m_{f_M} H_M b_{k_M} + 2m_{si_M} H_M^2 + 2m_{si.c_M} H_M - \frac{u_M \cdot k_{D_M} \cdot b_{k_M} \cdot h_{pic_M} \cdot l_{pic_M} \sin \lambda_M + \frac{E_{A_M} \cdot \Delta x_M \cdot D_{c_M} \cdot l_{pic_M} \sin^2 \lambda_M}{l_{c_M}}}{2 \cdot V_{pic_M} \cdot k_{\alpha_M} \cdot l_{c_M}} \quad (6)$$

Виходячи з подібності моделі і натурної установки, поділено відповідні доданки рівнянь (5) і (6) між собою і записано співвідношення:

$$\frac{P_{S_H}}{P_{S_M}} = \frac{m_{f_H} H_H b_{k_H}}{m_{f_M} H_M b_{k_M}} = \frac{2m_{si_H} H_H^2}{2m_{si_M} H_M^2} = \frac{2m_{si.c_H} H_H}{2m_{si.c_M} H_M} = \frac{u_H \cdot k_{D_H} \cdot b_{k_H} \cdot h_{pic_H} \cdot l_{pic_H} \sin \lambda_H}{2 \cdot V_{pic_H} \cdot k_{\alpha_H} \cdot l_{c_H}} \cdot \frac{E_{A_H} \cdot \Delta x_H \cdot D_{c_H} \cdot l_{pic_H} \sin^2 \lambda_H}{l_{c_H}}}{\frac{u_M \cdot k_{D_M} \cdot b_{k_M} \cdot h_{pic_M} \cdot l_{pic_M} \sin \lambda_M}{2 \cdot V_{pic_M} \cdot k_{\alpha_M} \cdot l_{c_M}} \cdot \frac{E_{A_M} \cdot \Delta x_M \cdot D_{c_M} \cdot l_{pic_M} \sin^2 \lambda_M}{l_{c_M}}}, \quad (7)$$

Використавши для цих співвідношень параметри натурального процесу через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності (4), отримано:

$$\frac{P_{S_M} \delta_{P_S}}{P_{S_M}} = \frac{\delta_{m_f} m_{f_M} \delta_H H_M \delta_{b_k} b_{k_M}}{m_{f_M} H_M b_{k_M}} = \frac{2\delta_{m_{si}} m_{si_M} \delta_H^2 H_M^2}{2m_{si_M} H_M^2} = \frac{2\delta_{m_{si.c}} m_{si.c_M} \delta_H H_M}{2m_{si.c_M} H_M} = \frac{\delta_u u_M \delta_{k_D} k_{D_M} \delta_{b_k} b_{k_M} \delta_{h_{pic}} h_{pic_M} \delta_{l_{pic}} l_{pic_M} \sin(\delta_\lambda \lambda_M)}{2\delta_{V_{pic}} V_{pic_M} \delta_{k_\alpha} k_{\alpha_M} \delta_{l_c} l_{c_M}} \cdot \frac{\delta_{E_A} E_{A_M} \delta_{\Delta x} \Delta x_M \delta_{D_c} D_{c_M} \delta_{l_{pic}} l_{pic_M} \sin^2(\delta_\lambda \lambda_M)}{\delta_{l_c} l_{c_M}}}{\frac{u_M k_{D_M} b_{k_M} h_{pic_M} l_{pic_M} \sin \lambda_M}{2V_{pic_M} k_{\alpha_M} l_{c_M}} \cdot \frac{E_{A_M} \Delta x_M D_{c_M} l_{pic_M} \sin^2 \lambda_M}{l_{c_M}}}, \quad (8)$$

Згрупувавши у рівності параметри за розмірностями та скоротивши вирази в рівності (8), отримано співвідношення між коефіцієнтами подібності:

$$\delta_{P_S} = \delta_{m_f} \cdot \delta_H \cdot \delta_{b_k} \cdot \delta_H^2 = \delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H = \frac{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{b_k} \cdot \delta_{h_{pic}} \cdot \delta_{l_{pic}}}{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_\alpha} \cdot \delta_{l_c}} \times \frac{\sin(\delta_\lambda \cdot \lambda_M)}{\sin \lambda_M} = \frac{\delta_{E_A} \cdot \delta_{\Delta x} \cdot \delta_{D_c} \cdot \delta_{l_{pic}}}{\delta_{l_c}} \cdot \frac{\sin^2(\delta_\lambda \cdot \lambda_M)}{\sin^2 \lambda_M}, \quad (9)$$

Розділивши всі елементи рівності (9) на δ_{P_S} , отримано систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\delta_{m_f} \cdot \delta_H \cdot \delta_{b_k}}{\delta_{P_S}} &= 1; \quad \frac{\delta_{m_{si}} \cdot \delta_H^2}{\delta_{P_S}} = 1; \quad \frac{\delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H}{\delta_{P_S}} = 1; \\ \frac{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{b_k} \cdot \delta_{h_{pic}} \cdot \delta_{l_{pic}}}{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_\alpha} \cdot \delta_{l_c} \cdot \delta_{P_S}} \cdot \frac{\sin(\delta_\lambda \cdot \lambda_M)}{\sin \lambda_M} &= 1; \\ \frac{\delta_{E_A} \cdot \delta_{\Delta x} \cdot \delta_{D_c} \cdot \delta_{l_{pic}}}{\delta_{l_c} \cdot \delta_{P_S}} \cdot \frac{\sin^2(\delta_\lambda \cdot \lambda_M)}{\sin^2 \lambda_M} &= 1. \end{aligned} \quad (10)$$

Система з п'яти рівнянь (10) зв'язує між собою сімнадцять невідомих величин [14]. Дванадцять з цих величин можна задати виходячи з відомих характеристик робочого органу та середовища:

$$\begin{aligned}
 \delta_{m_f} &= \frac{m_{fH}}{m_{fM}} = \frac{9700}{790000} = 0,127; \delta_{m_{si.c}} = \frac{m_{si.cH}}{m_{si.cM}} = \frac{13000}{22000} = 0,590; \delta_{m_{si}} = \frac{m_{siH}}{m_{siM}} = \frac{1420}{16250} = 0,087; \\
 \delta_u &= \frac{u_H}{u_M} = \frac{25,283}{25,282} = 1; \delta_{k_D} = \frac{k_{DH}}{k_{DM}} = \frac{19135326,1}{2159392,53} = 0,886; \delta_{l_{pic}} = \frac{l_{picH}}{l_{picM}} = \frac{0,083}{0,073} = 1,128; \\
 \delta_{V_{pic}} &= \frac{V_{picH}}{V_{picM}} = \frac{31,8289}{31,8293} = 0,999; \delta_{k_{\alpha}} = \frac{k_{\alpha H}}{k_{\alpha M}} = \frac{1}{1} = 1; \delta_{l_c} = \frac{l_{cH}}{l_{cM}} = \frac{0,084}{0,084} = 1; \\
 \delta_{E_A} &= \frac{E_{AH}}{E_{AM}} = \frac{13500000}{13500000} = 1; \delta_{\Delta x} = \frac{\Delta x_H}{\Delta x_M} = \frac{0,12582}{0,12583} = 0,999; \delta_{\lambda} = \frac{\lambda_H}{\lambda_M} = 1.
 \end{aligned} \tag{11}$$

а п'ять величин, що залишились, можна визначити з системи рівнянь (10).

Підставивши задані коефіцієнти подібності в систему рівнянь (10), було визначено величини коефіцієнтів, що залишились:

$$\begin{aligned}
 \delta_{P_S} &= \delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H; \\
 \delta_{b_k} &= \frac{\delta_{P_S}}{\delta_{m_f} \cdot \delta_H} = \frac{\delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H}{\delta_{m_f} \cdot \delta_H} = \frac{\delta_{m_{si.c}}}{\delta_{m_f}}; \\
 \delta_H^2 &= \frac{\delta_{P_S}}{\delta_{m_{si.c}}} = \frac{\delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H}{\delta_{m_{si}}} \Rightarrow \delta_H = \frac{\delta_{m_{si.c}}}{\delta_{m_{si}}}; \\
 \delta_{P_S} &= \delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_H = \delta_{m_{si.c}} \cdot \frac{\delta_{m_{si.c}}}{\delta_{m_{si}}} = \frac{(\delta_{m_{si.c}})^2}{\delta_{m_{si}}}.
 \end{aligned}$$

Прийемо $\sin^2(\delta_{\lambda} \lambda_M) / \sin^2(\lambda_M) = 1$. Тоді:

$$\delta_{D_c} = \frac{\delta_{l_c} \cdot \delta_{P_S}}{\delta_{E_A} \cdot \delta_{\Delta x} \cdot \delta_{l_{pic}}} = \frac{\delta_{l_c} (\delta_{m_{si.c}})^2}{\delta_{E_A} \cdot \delta_{\Delta x} \cdot \delta_{l_{pic}} \cdot \delta_{m_{si}}}, \tag{11}$$

Прийемо $\sin(\delta_{\lambda} \lambda_M) / \sin(\lambda_M) = 1$. Тоді:

$$\delta_{h_{pic}} = \frac{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_{\alpha}} \cdot \delta_{l_c} \cdot \delta_{P_S}}{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{b_k} \cdot \delta_{l_{pic}}} = \frac{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_{\alpha}} \cdot \delta_{l_c} \cdot (\delta_{m_{si.c}})^2 \cdot \delta_{m_f}}{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{l_{pic}} \cdot \delta_{m_{si}} \cdot \delta_{m_{si.c}}} = \frac{\delta_{V_{pic}} \cdot \delta_{k_{\alpha}} \cdot \delta_{l_c} \cdot \delta_{m_{si.c}} \cdot \delta_{m_f}}{\delta_u \cdot \delta_{k_D} \cdot \delta_{l_{pic}} \cdot \delta_{m_{si}}}. \tag{12}$$

Отримані співвідношення (таблиця 2) дають можливість побудувати фізичну модель установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП, що буде подібна натуральному робочому органу розпушника [15].

Таблиця 1. Коефіцієнти подібності

Table 1. Similarity coefficients

Коефіцієнти задані виходячи з відомих геометричних та фізичних параметрів		Коефіцієнти вираховані
$\delta_{m_f} = 0,127$	$\delta_{m_{si.c}} = 0,59$	$\delta_{b_k} = 0,684$
$\delta_{m_{si}} = 0,087$	$\delta_u = 1$	$\delta_H = 0,147$
$\delta_{k_D} = 0,886$	$\delta_{l_{pic}} = 1,128$	$\delta_{D_c} = 1,179$
$\delta_{V_{pic}} = 0,999$	$\delta_{k_{\alpha}} = 1$	$\delta_{h_{pic}} = 0,018$
$\delta_{l_c} = 1$	$\delta_{E_A} = 1$	$\delta_{P_S} = 0,013$
$\delta_{\Delta x} = 0,999$	$\delta_{\lambda} = 1$	

В якості фізичної моделі установки з врахуванням коефіцієнтів подібності та передбачених задач досліджень було доопрацьовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА [16] (рис. 2), що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання [17].

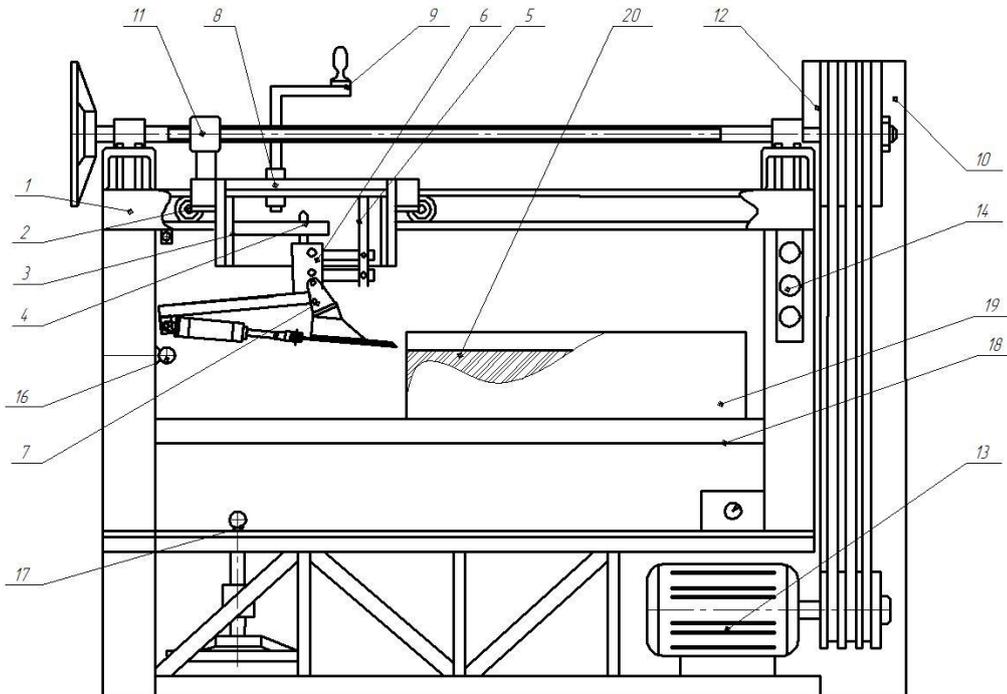


Рис.3. Кінематична схема лабораторного стенда «Динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА»

Fig. 3. Kinematic diagram of the laboratory stand Dynamometric stand for recording force load of the author's design of the KNUBA

Модель наконечника розпушника складається з вушка 1. клиноподібного корпуса 2. шириною 0,06 м загостреного під кутом 45° , в нижній частині якого влаштовано пластину 3. що може переміщуватись на відстань 0,1 м по відношенню до клиноподібного корпуса 2. та загострена в передній частині під кутом 45° утворюючи ріжучу кромку висотою 0,002 м до тильної сторони пластини 3 влаштований шток пневмо циліндра 4 (який відіграє роль пневмоакумулятора) діаметр його поршня дорівнює 0,04 м. корпус пневмо циліндра жорстко закріплений до вушка 1.

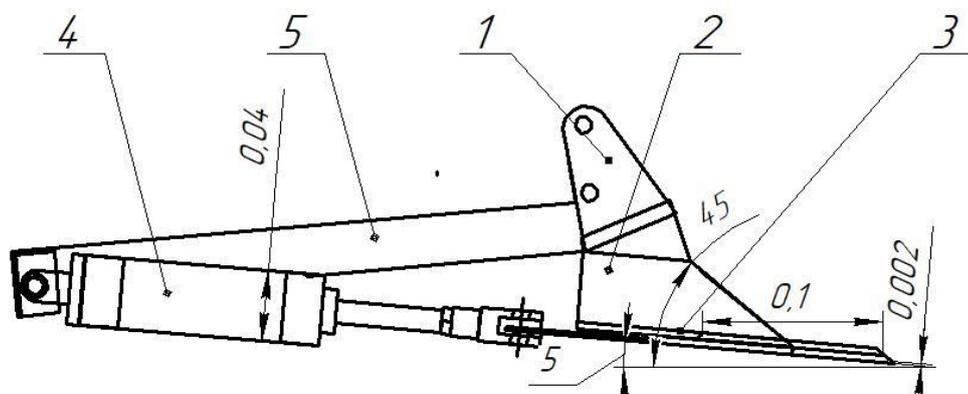


Рис.2. Наконечник розпушника, який обладнаний ДРКП

Fig. 2. The tip of the tiller equipped with a DRKP

Представлений лабораторний стенд дозволяє проводити повноцінні експериментальні дослідження по визначенню силових параметрів процесу взаємодії робочого органу з робочим середовищем [18]. В якості робочого середовища запропоновано використовувати парафін з огляду на його властивість змінювати оптичні властивості під навантаженням.

5. Висновки.

1. В результаті проведених досліджень, використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання, визначено умови подібності установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП, в якій взаємодія робочого органу та робочого середовища описується силовим рівнянням із врахуванням їх параметрів.

2. Визначено коефіцієнти подібності, що були використані при відображенні параметрів натурального процесу взаємодії робочого органу з робочим середовищем через параметри фізичної моделі.

3. Отримані значення коефіцієнтів подібності дали можливість побудувати фізичну модель установки для різання ґрунтів наконечник з ДРКП, що подібна натуральному робочому органу розпушника.

4. В якості фізичної моделі установки з врахуванням коефіцієнтів подібності та передбачених задач досліджень було доопрацьовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА для дослідження процесу різання ґрунтів, що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу.

5. В якості робочого середовища запропоновано використовувати парафін з огляду на його властивість змінювати оптичні властивості під навантаженням.

6. Моделювання процесів різання ґрунтів є важливим напрямом у наукових та прикладних дослідженнях, що дозволяє глибше зрозуміти механізми взаємодії робочого органу машини з ґрунтовим середовищем. Реальні експерименти з ґрунтами часто потребують значних витрат часу, коштів та енергії, а також супроводжуються труднощами відтворення однакових умов. Використання фізичних моделей дозволяє вирішити ці проблеми й отримати достовірні результати без проведення великої кількості дорогих натурних випробувань.

7. Завдяки моделюванню можна досліджувати:

- силові параметри процесу різання, зокрема залежність опору ґрунту від швидкості руху, глибини занурення та геометрії ріжучого інструмента;
- кінематичні характеристики, що описують траєкторію та швидкість переміщення робочого органу;
- динамічні ефекти, пов'язані з вібраціями, ударами та інерційними силами, які виникають під час різання;
- структуру та поведінку ґрунту, зокрема процес його деформації, руйнування та переміщення у зоні контакту з інструментом.

8. Отримані в результаті моделювання дані в подальшому буде застосовано для оптимізації конструкцій робочих органів землерийних і будівельних машин, зниження енергоспоживання, підвищення продуктивності та довговічності техніки. Крім того, моделі дозволяють прогнозувати роботу обладнання в різних ґрунтових умовах, що особливо важливо для проектування машин універсального призначення.

9. Таким чином, моделювання процесів різання ґрунтів є потужним інструментом, який поєднує в собі економічну доцільність, аналітичну точність та практичну корисність, сприяючи створенню ефективніших і надійніших технічних рішень у будівельній та сільськогосподарській сферах.

Список використаних джерел:

1. Ловейкін В. С., Назаренко І. І., Онищенко О. Г. Теорія технічних систем: навчальний посібник. Київ-Полтава: ІЗМН-ПДТУ, 1998. 175 с.
2. Ловейкін В. С., Почка К. І. Побудова фізичної моделі роликів формувальної установки з рекуперативним приводом. *Техніка будівництва*. 2007. № 20. С. 26-31.
3. Ловейкін В. С., Почка К. І. Динаміка роликів формувальної установки: монографія. К.-Ромни: КНУБА, «ІСА-Інтерпапір», 2009. 228 с.
4. Почка К. І., Абрашкевич Ю. Д., Пристайло М. О., Поліщук А. Г. Побудова фізичної моделі установки для різання високоабразивних матеріалів абразивними армованими кругами. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. № 3 (82). С. 30-36. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2022.3.4.
5. Почка К. І., Абрашкевич Ю. Д., Пристайло М. О., Поліщук А. Г. Визначення параметрів фізичної моделі установки для різання високоабразивних матеріалів абразивними армованими кругами. *Information activity as a component of science development: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference (April 04–07, 2023)*. Edmonton, Canada. P. 561–570.
6. Pochka K., Prystailo M., Delembovskyi M., Balaka M., Maksymiuk Y., Polishchuk A. Features of the Dynamic Interaction Between the Elastically Deformed Working Body of a Ripper-Pick and the Soil. In: Prentkovskis O., Yatskiv (Jackiva) I., Skačkauskas P., Karpenko M., Stosiak M. (eds) *TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology. TRANSBALTICA 2024. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, Cham. 2025. P. 557–565. DOI: 10.1007/978-3-031-85390-6_52.
7. Rashkivskiy V., Prystailo M., Fedyshyn B., Balaka M. Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. 4(1). 79–92. DOI: 10.46299/j.isjea.20250401.07.
8. Пелевін Л. Є., Балака М. М., Пристайло М. О., Мачишин Г. М., Аржасв Г. О. Теоретичні основи взаємодії пружно-деформованих виконавчих елементів будівельної техніки і робочого середовища з врахуванням термореологічних процесів. К.: Інтерсервіс, 2015. 232 с.
9. Аржасв Г., Пелевін Л., Балака М. Методика й інформаційно-вимірювальне забезпечення експериментального визначення параметрів реологічної моделі піщано-глинистих ґрунтів. *Машинознавство*. 2008. № 12 (138). С. 40-42.
10. Аржасв Г., Пелевін Л., Балака М. Визначення параметрів реологічних моделей опорних поверхонь руху позашляхових транспортно-технологічних засобів. *Машинознавство*. 2008. № 10 (136). С. 22-24.
11. Рашківський В. П., Балака М. М. Винахідницько-пошукова робота у науковій діяльності та міжнародне співробітництво. К.: КНУБА, 2021. 44 с.
12. Loveikin V., Pochka K., Balaka M., Pochka O. Experimental research procedure of roller forming unit. *Himychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*. 2023. (102). 31–37. DOI: 10.32347/gbdmm.2023.102.0302.
13. Федішин Б., Балака М. Верифікація переміщення просторово орієнтованого ножа на випробувальному стенді. *Енергоощадні машини і технології: матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. (20–21 трав. 2025 р.)*. К.: КНУБА, 2025. С. 57–60.
14. Gorbatyuk Ie., Balaka M., Mishchuk D. Information model of bulldozer-looser movement. *The world of science and innovation: Abstracts of the 7th International Scientific and Practical Conference (February 10–12, 2021)*. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2021. P. 54–59.
15. Prystailo M., Balaka M., Mozharivskiy V., Drachuk V., Honta I. Superposition principle of impact on the working environment of actuating elements for site preparation machines. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2024. Vol. 1 No. 105. 61–67. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.1.61.
16. Mase G. T., Smelser R. E., Rossmann J. S. *Continuum Mechanics for Engineers*. 4th ed. Boca Raton. CRC Press, 2020. 450 p.
17. Look B. G. *Earthworks: Theory to Practice – Design and Construction*. Boca Raton. CRC Press, 2022. 590 p.
18. Nowak P. *Earthworks: A guide*. 2nd ed. London. ICE Publishing, 2015. 360 p.

References:

1. Loveikin V. S., Nazarenko I. I., Onyshchenko O. H. *Teoriya tekhnichnykh system [Theory of technical systems]: navchalnyi posibnyk [study guide]*. Kyiv-Poltava, IZMN-PDTU [Institute of the content of teaching methods – Poltava State Technical University]. 1998. 175 p.

2. Loveikin V. S., Pochka K. I. Pobudova fizychnoyi modeli rolykovoyi formuvalnoyi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom [Construction of a physical model of a roller forming unit with a recuperative drive]. *Tekhnika budivnytstva* [Construction technology]. 2007. No. 20. P. 26–31.
3. Loveikin V. S., Pochka K. I. Dynamika rolykovoyi formuvalnoyi ustanovky [Dynamics of the roller forming unit]. *Monohrafiya* [Monograph]. Kyiv-Romny, KNUCA, «ISA-Interpapier». 2009. 228 p.
4. Pochka K. I., Abrashkevych Yu. D., Prystailo M. O., Polishchuk A. G. Pobudova fizychnoyi modeli ustanovky dlya rizannya vysokoabrazyvnykh materialiv abrazyvnymi armovanymi kruhamy [Construction of a physical model of an installation for cutting highly abrasive materials with abrasive reinforced wheels]. *Visnyk of Kherson National Technical University*. 2022. Issue 3 (82). P. 30–36. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2022.3.4.
5. Pochka K. I., Abrashkevych Yu. D., Prystailo M. O., Polishchuk A. G. Vyznachennya parametriv fizychnoyi modeli ustanovky dlya rizannya vysokoabrazyvnykh materialiv abrazyvnymi armovanymi kruhamy [Determination of the parameters of the physical model of the installation for cutting highly abrasive materials with abrasive reinforced wheels] // *Information activity as a component of science development: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference (April 04–07, 2023)*. Edmonton, Canada. 2023. P. 561–570.
6. Pochka K., Prystailo M., Delembovskyi M., Balaka M., Maksymiuk Y., Polishchuk A. Features of the Dynamic Interaction Between the Elastically Deformed Working Body of a Ripper-Pick and the Soil. In: Prentkovskis O., Yatskiv (Jackiva) I., Skačkauskas P., Karpenko M., Stosiak M. (eds) *TRANSBALTICA XV: Transportation Science and Technology*. TRANSBALTICA 2024. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham. 2025. P. 557–565. DOI: 10.1007/978-3-031-85390-6_52.
7. Rashkivskiy V., Prystailo M., Fedyshyn B., Balaka M. Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. 4(1). 79–92. DOI: 10.46299/j.isjea.20250401.07.
8. Pelevin L. Ye., Balaka M. M., Prystailo M. O., Machyshyn H. M., Arzhaiev H. O. Teoretychni osnovy vzaemodii pruzhno-deformovanykh vykonavchykh elementiv budivelnoi tekhniki i robochoho seredovyscha z vrakhuvanniam termoreolohichnykh protsesiv [Interaction theoretical foundations of elastically deformed actuating elements for construction equipment and working environment taking into account thermorheological processes]: monograph. Kyiv. 2015. 232 p.
9. Arzhaiev H., Pelevin L., Balaka M. Metodyka y informatsiino-vymiriuvalne zabezpechennia eksperymentalnoho vyznachennia parametriv reolohichnoi modeli pischano-hlynystykh gruntiv [Methodology and information-measuring support for experimental determination of rheological model parameters of sandy-clayey soils]. *Mashynoznavstvo*. 2008. № 12 (138). P. 40–42.
10. Arzhaiev H., Pelevin L., Balaka M. Vyznachennia parametriv reolohichnykh modelei opornykh poverkhon rukhu pozashliakhovykh transportnotekhnolohichnykh zasobiv [Determination of rheological model parameters of support surfaces for off-road transport and technological vehicles]. *Mashynoznavstvo*. 2008. № 10 (136). P. 22–24.
11. Rashkivskiy V. P., Balaka M. M. Vynakhidnytsko-poshukova robota u naukovii diialnosti ta mizhnarodne spivrobitnytstvo [Inventive and research work in scientific activity and international cooperation]. Kyiv: KNUBA, 2021. 44 p.
12. Loveikin V., Pochka K., Balaka M., Pochka O. Experimental research procedure of roller forming unit. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*. 2023. (102). 31–37. DOI: 10.32347/gbdmm.2023.102.0302.
13. Fedyshyn B., Balaka M. Veryfikatsiia peremischennia prostoroovo oriientovanoho nozha na vyprobuvalnomu stendi [Verification of spatially oriented knife movement on test stand]. *Enerhooschadni mashyny i tekhnolohii* [Energy saving machines and technologies]: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference (May 20–21, 2025). Kyiv: KNUBA, 2025. P. 57–60.
14. Gorbatyuk Ie., Balaka M., Mishchuk D. Information model of bulldozer-looser movement. *The world of science and innovation: Abstracts of the 7th International Scientific and Practical Conference (February 10–12, 2021)*. Cognum Publishing House. London, United Kingdom. 2021. P. 54–59.
15. Prystailo M., Balaka M., Mozharivskiy V., Drachuk V., Honta I. Superposition principle of impact on the working environment of actuating elements for site preparation machines. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*. 2024. Vol. 1 No. 105. 61–67. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.1.61.
16. Mase G. T., Smelser R. E., Rossmann J. S. *Continuum Mechanics for Engineers*. 4th ed. Boca Raton. CRC Press, 2020. 450 p.
17. Look B. G. *Earthworks: Theory to Practice – Design and Construction*. Boca Raton. CRC Press, 2022. 590 p.
18. Nowak P. *Earthworks: A guide*. 2nd ed. London. ICE Publishing, 2015. 360 p.

УДК 693.542.524

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0602>**¹Володимир Кулай,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4990-5336>, e-mail: lykym339@gmail.com**¹Олексій Васильєв,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>, e-mail: a.s.vasiliev.76@gmail.com

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп.
Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФОРМИ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

АНОТАЦІЯ. На сьогодні у зв'язку з активним розвитком технологій у галузі виробництва будівельних сумішей одним із найбільш актуальних завдань є створення високоефективних змішувачів. Одним із ключових показників, що впливає як на якість готової суміші так і на економічність процесу, є енергоспоживання змішувальної установки. Автори наводять результати дослідження впливу геометричної форми робочих органів мобільної установки для приготування ніздрюватих бетонів на енерговитрати процесу змішування. Розглядається конструктивні особливості змішувального обладнання примусової дії з вертикальним розташуванням валу та встановлено, що зміна профіля лопатей впливає на інтенсивність переміщення частинок суміші, характер формування потоку та рівень навантаження на приводний механізм. Запропоновано експериментальну методику оцінювання енергоспоживання змішувача шляхом порівняння трьох варіантів робочих органів, які відрізняються геометрією та площею взаємодії з матеріалом. На основі аналізу отриманих даних визначено найбільш раціональну форму лопатей, що забезпечує підвищення однорідності суміші та зниження витрат електроенергії. На основі даних побудовано графічні залежності, які відображають зміну енергоспоживання установки. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні енергоефективних змішувачів примусової дії та оптимізації технологічних режимів приготування ніздрюватих бетонів у виробничих умовах.

Ключові слова: бетонозмішувач з вертикальним валом, потужність приводу, математичне моделювання, енергоефективність, робочий орган, лопать.

STUDY OF THE ENERGY CONSUMPTION OF THE INSTALLATION FOR THE PREPARATION OF NOSTRIL CONCRETE DEPENDING ON THE SHAPE OF THE WORKING BODIES

ABSTRACT. Today, in connection with the active development of technologies in the field of production of construction mixtures, one of the most urgent tasks is the creation of highly efficient mixers. One of the key indicators that affects both the quality of the finished mixture and the economy of the process is the energy consumption of the mixing plant. The authors present the results of the study of the influence of the geometric shape of the working bodies of the mobile installation for the preparation of aerated concrete on the energy consumption of the mixing process. The design features of the forced-action mixing equipment with a vertical location of the shaft are considered and it was established that the change in the profile of the blades affects the intensity of movement of the mixture particles, the nature of flow formation and the level of load on the drive mechanism. An experimental method of estimating the energy consumption of the mixer by comparing three variants of working bodies, which differ in geometry and area of interaction with the material, is proposed. Based on the analysis of the obtained data, the most rational shape of the blades was determined, which ensures an increase in the homogeneity of the mixture and a decrease in electricity consumption. On the basis of the data, graphic dependencies are constructed that reflect the change in the power consumption of the installation. The results of the work can be used in the design of energy-efficient forced action mixers and optimization of technological modes of preparation of aerated concrete in production conditions.

Keywords: concrete mixer with vertical shaft, drive power, mathematical modeling, energy efficiency, working body, blade.

1. Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку будівництва відзначається зростанням вимог до енергоефективності технологічних процесів і якості будматеріалів. Сучасні дослідження акцентують увагу на мобільних установках примусової дії, що забезпечують компактність, універсальність і високу енергоефективність. Невідповідність потужності приводу реальним технологічним потребам може призводити до надмірних енергетичних втрат або, навпаки, до погіршення якості перемішування через недостатню інтенсивність дії. Ефективність виготовлення ніздрюватих бетонів у великій мірі визначається характером взаємодії робочого органу змішувача з компонентами суміші. Один із основних конструктивних показників, що визначає якість перемішування, є геометричний вигляд лопатей. Спосіб переміщення частинок та рівномірність розподілу пороутворювача залежать від конфігурації робочих органів. Таким чином, важливість дослідження викликана необхідністю встановлення оптимальної конфігурації робочого органу та підвищення енергоефективності мобільних змішувачів примусової дії через аналітичне й експериментальне дослідження чинників, що впливають на потужність приводу та загальні енергетичні характеристики процесу змішування ніздрюватих бетонів

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення ефективності будівельного виробництва в сучасних умовах повинно забезпечуватися в основному за рахунок зростання продуктивності праці, скорочення термінів будівництва, і вартості робіт. На сьогодні у зв'язку з активним розвитком технологій у галузі виробництва будівельних сумішей одним із найбільш актуальних завдань є створення вискоелективних змішувачів. До таких установок висуваються вимоги які полягають у зниженні енерговитрат та розширенні номенклатури одержаної продукції яка може бути приготовлена при забезпеченні високої якості змішування суміші. Додаткову актуальність цьому напряму надає складна ситуація на енергетичному ринку України, що обумовлює необхідність розроблення конструкцій змішувачів із суттєво зменшеними витратами електроенергії в процесі експлуатації.

Аналіз останніх наукових і технічних робіт свідчить про зростання інтересу дослідників до проблеми оптимізації енергоспоживання при приготуванні бетонних та розчинних сумішей. У більшості сучасних робіт [1–4] підкреслюється, що величина енерговитрат змішувальних установок визначається комплексом чинників, серед яких ключову роль відіграють конструктивні особливості робочих органів, фізико-механічні властивості суміші та кінематичні режими роботи обладнання. У зв'язку з цим постає необхідність формування теоретичних засад, які дозволять якісно описати вплив кінематичних параметрів та геометрії робочих органів на траєкторії руху частинок суміші під час їх перемішування. Саме такі теоретичні моделі здатні слугувати основою для подальших інженерних рішень щодо зниження енергоспоживання та підвищення ефективності розчинозмішувачів.

Окремий напрям досліджень присвячено удосконаленню методів оцінювання енергоефективності змішувачів [5, 6]. Сучасні підходи базуються на комплексному аналізі, який поєднує експериментальні дані щодо споживаної потужності з аналітичним моделюванням силової взаємодії між робочими органами та частинками суміші.

У значній кількості публікацій дослідники звертають увагу на змішувачі з вертикально розташованим приводним валом. Такі системи забезпечують утворення зон зниженого опору руху частинок, це сприяє інтенсифікації перемішування, покращує рівномірність структури суміші та підвищує ефективність роботи обладнання при приготуванні складних або багатокомпонентних сумішей [7, 8].

3. Мета і завдання дослідження. Мета даної статті полягає у висвітленні результатів дослідження впливу форми робочих органів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів та залежності від впливу факторів, таких як: частота обертання, час перемішування та рухливість суміші.

4. Основний матеріал і результати. Процес роботи змішувачів примусової дії ґрунтується на інтенсивному перемішуванні компонентів шляхом обертання лопатей,

розташованих на валу. Такий принцип сприяє активному переміщенню частинок суміші у межах всього робочого об'єму та забезпечує утворення однорідної структури суміші.

За результатами конструкторських напрацювань була створена експериментальна установка для виробництва ніздрюватих бетонів, з вертикально розташованим приводним валом (рис. 1) [9, 10]. Головною ознакою виготовленої установки є можливість швидкої заміни робочих органів та регулювання швидкості обертання лопатей. Це дозволяє досліджувати вплив форми робочих органів на ефективність процесу змішування та витрати електроенергії. Завдяки модульному підходу, установка може бути адаптована до різних рецептур сумішей, одночасно забезпечуючи високу точність експериментів та аналізу динамічних характеристик процесу.



Рис. 1. Установка для приготування ніздрюватих бетонів
Fig. 1. Installations for the preparation of cellular concrete

В умовах зростання вимог до енергоефективності технологічного обладнання важливо зменшувати електроспоживання установок для приготування ніздрюватих бетонів.

Головною ознакою виготовленої установки є можливість швидкої заміни робочих органів та регулювання швидкості обертання лопатей. Це дозволяє досліджувати вплив форми робочих органів на ефективність процесу змішування та витрати електроенергії. Завдяки модульному підходу, установка може бути адаптована до різних рецептур сумішей, одночасно забезпечуючи високу точність експериментів та аналізу динамічних характеристик процесу.

Головною ознакою виготовленої установки є можливість швидкої заміни робочих органів та регулювання швидкості обертання лопатей. Це дозволяє досліджувати вплив форми робочих органів на ефективність процесу змішування та витрати електроенергії. Завдяки модульному підходу, установка може бути адаптована до різних рецептур сумішей, одночасно забезпечуючи високу точність експериментів та аналізу динамічних характеристик процесу.



а (a)

б (b)

в (c)

Рис. 2. Змінні робочі органи установки для приготування ніздрюватих бетонів
 а) робочий орган у формі прямокутного перерізу; б) робочий орган у формі умовно трикутного перерізу; в) робочий орган у формі круглого перерізу.

Fig. 2. Replaceable working elements of the installation for preparing cellular concrete
 a) working body in the form of a rectangular section; b) working body in the form of a conventionally triangular section; c) working body in the form of a round section.

З метою вивчення енерговитрат при використанні різних змінних робочих органів установки для приготування ніздрюватих бетонів було проведено експериментальні вимірювання кількості спожитої енергії під час змішування суміші у робочому контейнері (рис. 3). Принцип роботи такого змішувача полягає в обертанні лопатей, закріплених на вертикальному приводному валу в нижній частині змішувальної камери. Під час роботи лопаті здійснюють інтенсивний механічний вплив на суміш, забезпечуючи рівномірний розподіл компонентів у всьому об'ємі робочої зони. Саме умови взаємодії лопатей із середовищем, що переміщується, визначають величину споживаної потужності та рівень енерговитрат установки загалом.



Рис. 3. Показники лічильника при виконанні експерименту

Figure 3. Counter readings during the experiment

Для визначення впливу змінних робочих органів установки на енерговитрати та отримання достовірної математичної моделі впливу робочого органу на матеріал при проведенні експериментальних досліджень застосовані методи математичного планування та математичної статистики [11]. В таблиці 1 наведено діапазони варіювання факторів на основі попередніх теоретичних досліджень та конструктивних обмежень установки. Кожен фактор варіювався на трьох рівнях: мінімальному, середньому та максимальному.

Таблиця 1. Діапазони зміни вихідних факторів.

Table 1. Ranges of change of initial factors.

№	Найменування	Розмірність	Позначення	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Нижній рівень (-)	Інтервал варіювання
X_1	Час впливу	с	t	50	40	30	10
X_2	Частота обертання	об/хв	n	620	465	310	155
X_3	Рухливість суміші	см	Π	12	10	8	2

Для знаходження ступеня впливу рухливості суміші Π , часу перемішування суміші t та частоти обертання вертикального приводного валу n на енерговитрати дослідного обладнання при різних формах робочого органу, було поставлено за мету знаходження функціональної залежності впливу вищенаведених параметрів на витрати електроенергії P досліджуваної установки для приготування ніздрюватих бетонів.

$$P = f(t, n, \Pi). \quad (1)$$

Матриця планування експерименту та отримані результати вимірювань електроенергії які проводилися у діапазонах зміни описаних вище вихідних факторів, наведені в таблиці 2.

Реалізація експерименту та обробка отриманих даних дозволяють отримати математичну модель витрати електроенергії установки для приготування ніздрюватих бетонів у вигляді рівняння регресії:

$$y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3. \quad (2)$$

де y – витрати електроенергії; b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти рівняння регресії.

Таблиця 2. Реалізація плану експерименту.

Table 2. Implementation of the experiment plan.

№ досліджу	Матриця планування (x_i)			Квадрати параметрів (x_i^2)			Взаємодія ($x_i x_j$)			Витрати електроенергії, Вт
	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	y_i
N_I	1	+	+	+	+	+	+	+	+	70
	2	—	+	+	+	+	—	—	+	56
	3	+	—	+	+	+	+	—	—	64
	4	—	—	+	+	+	+	+	—	42
	5	+	+	—	+	+	+	+	—	78
	6	—	+	—	+	+	+	—	+	64
	7	+	—	—	+	+	+	—	—	61
	8	—	—	—	+	+	+	+	+	54
N_a	9	+	0	0	+	0	0	0	0	65
	10	—	0	0	+	0	0	0	0	55
	11	0	+	0	0	+	0	0	0	59
	12	0	—	0	0	+	0	0	0	57
	13	0	0	+	0	0	+	0	0	50
	14	0	0	—	0	0	+	0	0	58
n_0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	55
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	56
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	54

Розраховані значення коефіцієнтів регресії перевірено на значущість за критерієм Стьюдента та встановлено, що всі вони є значущими.

Отже, шукане рівняння регресії має вигляд:

$$y_i = 55.239 + 6.7x_1 + 4.9x_2 - 3.3x_3 + 4.606x_1^2 + 2.6.6x_2^2 - 1.394x_3^2 - 0.125x_1x_2 + 1.875x_1x_3 - 0.875x_2x_3. \quad (3)$$

Одержане рівняння встановлює залежність витрати електроенергії від значень визначених факторів. Дане рівняння перевірено на адекватність за критерієм Фішера:

$$\begin{aligned} P_p &\leq P_{таб} \\ 16,64 &\leq 19,3 \end{aligned} \quad (4)$$

Встановлено, що різниця відповідних значень даних експерименту та обчислених за рівнянням регресії не перевищує допустимі межі і рівняння регресії з достатньою точністю відображає реальний процес роботи робочого органу.

Використовуючи програмне забезпечення були побудовані графіки, що демонструють вплив трьох основних факторів – часу впливу, рухливості суміші та частоти обертання на витрати електроенергії при змінних робочих органах.

Графіки залежності величини витрати електроенергії змішувача при фіксованому одному параметрі та змінним двома іншими в визначених діапазонах показано на рис. 4 – 6 (1 – робочий орган у формі прямокутного перерізу; 2 – робочий орган у формі умовно трикутного перерізу; 3 – робочий орган у формі круглого перерізу).

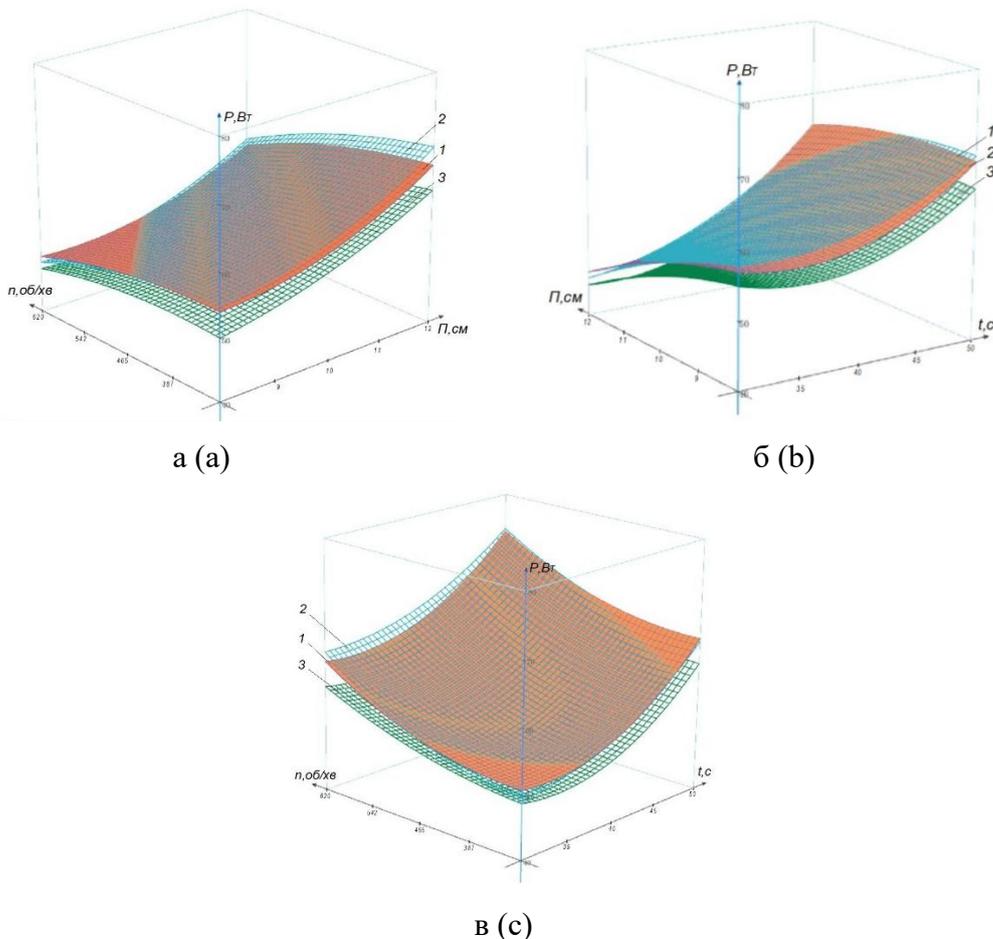


Рис. 4. Графік залежності витрат електроенергії P від: а - часу впливу t та рухливості суміші Π ; б - рухливості суміші Π та часу впливу t ; в - частоти обертання n та часу впливу t .

Fig. 4. Graph of the dependence of electricity consumption P on the: a - time of exposure t and mobility of the mixture Π ; b - mobility of the mixture Π and exposure time t ; c - rotation frequency n and exposure time t

Проаналізувавши отримані експериментальні результати які відображені на графіках (рис. 4–6), простежується залежність впливу форми робочого органу на витрати електроенергії. На всіх трьох графіках робочий орган який має круглий поперечний переріз лопаті змішувача показав найменшу спожиту електроенергію. Це забезпечує можливість глибше зрозуміти характер енергоспоживання установки та визначити шляхи його подальшої оптимізації в умовах промислового застосування. Також було встановлено, що збільшення тривалості перемішування супроводжується пропорційним зростанням енерговитрат, що зумовлено необхідністю підтримання сталого режиму роботи приводу. Разом з тим визначено оптимальний час змішування ніздрюватих бетонів — 40 с, який забезпечує досягнення необхідної однорідності без надмірного енергоспоживання. Значний вплив на формування енергетичного режиму відіграє й рухливість суміші, оптимальне значення якої становить 12 см, що гарантує ефективну взаємодію лопатей із матеріалом та стабільність технологічного процесу.

5. Висновки. У статті описано проведення дослідження по встановленню впливу геометричної форми робочого органу на енерговитрати процесу змішування у мобільній установці для приготування ніздрюватих бетонів. Експериментальні дослідження виконані на спеціально розробленій установці які дозволили порівняти роботу трьох типів лопатей — прямокутного перерізу, умовно трикутного перерізу та круглого перерізів та визначити їх вплив на витрати електроенергії без погіршення якості перемішування. В першу чергу було отримано математичну модель, що описує зміну енергоспоживання змішувача залежно від частоти обертання робочого органу, тривалості перемішування та рухливості суміші. Модель підтвердила, що саме ці фактори формують основний енергетичний режим змішування та визначають продуктивність процесу.

Побудовані за результатами експериментальних досліджень графіки залежності спожитої потужності від часу впливу, частота обертання та рухливості суміші показують, що енерговитрати найменші при застосуванні лопаті з круглим перерізом за якої забезпечується мінімальне енергоспоживання при збереженні високої інтенсивності перемішування. Це дозволяє обґрунтовано підходити до вибору оптимальної форми лопатей і режимів роботи змішувальної установки.

Отримані результати становлять практичний інтерес для модернізації існуючих змішувальних установок, а також можуть бути використані при проектуванні нових типів обладнання з підвищеною енергоефективністю. Виявлені закономірності розширюють наукове розуміння процесів взаємодії робочих органів із сумішшю та створюють підґрунтя для подальших досліджень у напрямі вдосконалення конструкцій мобільних змішувачів примусової дії.

Список використаних джерел:

1. Назаренко І. І. (2017) Визначення раціональних параметрів гравітаційних бетонозмішувачів. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 90. С. 67-72.
2. Вірченко В. В. (2006) Приготування будівельних розчинових сумішей за допомогою ефективних змішувачів. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Вип. 1(66). Ч. 1. С. 71 – 74.
3. Свиридюк Д. Я. (2011) Аналіз та оцінка конструктивно – технологічних параметрів бетонозмішувачів. Теорія і практика будівництва. Вип. № 8. С. 11-14.
4. Онищенко О. Г., Ващенко К. М. (2006) Розрахунок потужності та визначення опорів, що виникають при роботі стрічкового шнекового розчинозмішувача. Вісник КДПУ. Вип. 1(36). С. 58 – 63
5. Popov S.V., Shpylka A.M., Gnitko. S.M. (2018) The research of mortar components mixing process. International Journal of Engineering & Technology, no.3.2(7), pp. 27–31.
6. Gyawali, T.R. (2019). Mixing of High Ductile Mortar (HDM) in Concrete Mix-ers. Journal of Engineering Technology and Planning, 2019, (1), pp. pp. 1–10. <https://doi.org/10.3126/joetp.v1i0.38238>.

7. Коробко Б.О., Васильєв О.С., Рогозін І.А. (2013). Установа розчинозмішувальна з вертикальним шнеком (Патент України № 81413).
8. Rohozin I.A., Vasyliiev O.S., Pavelieva. A.K. Determination of Building Mortar Mixers Effectiveness. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, no.3.2(7), P. 360–366.
9. Васильєв О.С., Яковенко А.М., Кулай В.П. (2025). Мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів (Патент України № 161192).
10. Васильєв О.С., Кулай В.П. Аналіз необхідної потужності для приведення в рух лопатей установки для приготування ніздрюватих бетонів. *Технічні науки та технології*, 2025. № 3 (41), С. 472–479. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-472-479](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-472-479)
11. Нечаєв В.П., Берідзе Т.М., Кононенко В.В. (2005). Теорія планування експерименту. Київ: Кондор.

References:

1. Nazarenko I. I. (2017) Vyznachennia ratsionalnykh parametriv hraitatsiinykh betonozmishuvachiv [Determination of rational parameters of gravity concrete mixers]. *Gimichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini*. Vol. 90. 67-72.
2. Virchenko V. V. (2006) Preparation of mortar mixtures using effective mixers. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. Vol. 1(66). Ch. 1. 71 –74.
3. Svyrydiuk D. Ya. (2011) Analiz ta otsinka konstruktyvno – tekhnolohichnykh parametriv betonozmishuvachiv. [Analysis and evaluation of structural and technological parameters of concrete mixers] *Teoriia i praktyka budivnytstva*. Vol. № 8. 11-14.
4. Onyshchenko O., Vashchenko K. (2006) Rozrakhunok potuzhnosti ta vyznachennia oporiv, shcho vynykaiut pry roboti strichkovoho shnekovoho rozchynozmishuvacha. [Calculation of power and determination of resistances arising during the operation of a ribbon screw mortar mixer.] *Visnyk KDPU*. Vol. 1(36). 58 – 63.
5. Popov S.V., Shpylka A.M., Gnitko. S.M. (2018) The research of mortar components mixing process. *International Journal of Engineering & Technology*, no.3.2(7), pp. 27–31.
6. Gyawali, T.R. (2019). Mixing of High Ductile Mortar (HDM) in Concrete Mix-ers. *Journal of Engineering Technology and Planning*, 2019, (1), pp. pp. 1–10. <https://doi.org/10.3126/joetp.v1i10.38238>.
7. Korobko, B.O., Vasyliiev, O.S., Rohozin, I.A. (2013). Ustanovka rozchynozmishuvalna z vertykalnym shnekom [Mortar mixing plant with vertical screw] (Patent Ukrainy - Patent of Ukraine № 81413).
8. Rohozin I.A., Vasyliiev O.S., Pavelieva. A.K. Determination of Building Mortar Mixers Effectiveness. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, no.3.2(7), P. 360–366.
9. Vasyliiev O.S., Yakovenko A.M., Kulay V.P. (2025). Mobil'na ustanovka dlya pryhotuvannya nizdryuvatykh betoniv [Unit for cellular concrete preparation] (Patent Ukrainy - Patent of Ukraine № 161192).
10. Vasyliiev O., Kulay V. (2025) Analysis of the required power for driving the blades of the installation for the preparation of nostril concrete. *Technical sciences and technologies*. №3 (41), 472–479pp. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-472-479](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-472-479)
11. Nechaev V.P., Beridze T.M., Kononenko V.V. (2005). Theory of experiment planning. Kyiv: Condor.

УДК 620.179

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0603>**¹Віктор Нечипорук,**

аспірант кафедри машин і обладнання технологічних процесів,

<https://orcid.org/0009-0003-8091-2420>, e-mail: nechyporuk_vh-2022@knuba.edu.ua**²Сергій Орищенко,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри тракторів і автомобілів,

<https://orcid.org/0000-0002-5359-5285>, e-mail: oryschenko.sv@knuba.edu.ua¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна² Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна**СУЧАСНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ МАШИН**

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто сучасні підходи до технічної діагностики машин і механізмів, спрямовані на підвищення надійності, безпечності та ефективності їх експлуатації. Проаналізовано основні методи контролю технічного стану - вібраційну, акустичну, термографічну, електричну та аналітичну діагностику. Висвітлено принципи побудови систем моніторингу технічного стану, їх апаратне та програмне забезпечення. Особливу увагу приділено застосуванню методів машинного навчання та цифрової обробки сигналів у процесі діагностування. Наведено порівняльну характеристику традиційних і інтелектуальних методів діагностики, визначено переваги використання комплексного підходу для прогнозування відмов і планування технічного обслуговування. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні сучасних систем технічного моніторингу, автоматизованих комплексів обслуговування машин та в освітньому процесі підготовки фахівців машинобудівного профілю.

Ключові слова: технічна діагностика, вібраційний аналіз, термографія, моніторинг стану, машинне навчання, прогнозування відмов.

MODERN METHODS OF MACHINE DIAGNOSTICS

ABSTRACT. The article considers modern approaches to technical diagnostics of machines and mechanisms aimed at increasing the reliability, safety and efficiency of their operation. The main methods of monitoring the technical condition are analyzed - vibration, acoustic, thermographic, electrical and analytical diagnostics. The principles of building technical condition monitoring systems, their hardware and software are highlighted. Special attention is paid to the application of machine learning methods and digital signal processing in the diagnostic process. A comparative characteristic of traditional and intelligent diagnostic methods is presented, and the advantages of using an integrated approach for failure prediction and maintenance planning are identified. The results of the study can be used in the development of modern technical monitoring systems, automated machine maintenance complexes, and in the educational process of training specialists in the mechanical engineering field.

Keywords: technical diagnostics, vibration analysis, thermography, condition monitoring, machine learning, failure prediction.

1. Постановка проблеми. Підвищення надійності та довговічності машин і механізмів є одним із ключових завдань сучасного машинобудування та експлуатації техніки. Зростання складності конструкцій, використання високоточних компонентів і підвищення вимог до безпеки вимагають впровадження ефективних методів технічної діагностики. Традиційні способи контролю, що базуються на періодичних оглядах і планово-попереджувальному обслуговуванні, часто не забезпечують своєчасного виявлення дефектів, що призводить до непередбачуваних відмов і простоїв обладнання. У зв'язку з цим актуальним є дослідження та впровадження сучасних діагностичних технологій, які дозволяють здійснювати безперервний моніторинг технічного стану машин, виявляти початкові стадії зносу та прогнозувати залишковий ресурс. Особливого значення набуває

інтеграція методів вібраційного аналізу, акустичної емісії, термографії та машинного навчання, що дає змогу реалізувати інтелектуальні системи діагностики і технічного обслуговування за фактичним станом. Таким чином, проблема полягає у вдосконаленні існуючих методів технічної діагностики, підвищенні їхньої точності, швидкодії та автоматизації з метою забезпечення надійної та економічно ефективної експлуатації машин.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика технічної діагностики машин активно досліджується як у вітчизняній, так і в закордонній науковій літературі. Сучасні публікації присвячені вдосконаленню методів оцінювання технічного стану, розробленню інтелектуальних систем моніторингу та впровадженню автоматизованих засобів контролю [1-3]. У роботах провідних дослідників [9-11] розглянуто розвиток вібраційної діагностики, яка ґрунтується на аналізі спектральних характеристик коливань елементів машин. Цей метод дозволяє виявляти дисбаланс, неспіввісність, зношення підшипників, дефекти редукторів і роторів. Акустична діагностика базується на аналізі шумових сигналів та акустичної емісії, що утворюються під час роботи агрегатів [11, 15]. Вона ефективна для раннього виявлення тріщин, мікрodefектів і порушень у процесах тертя. Термографічна діагностика (інфрачервоне обстеження) широко застосовується для контролю нагрівання вузлів, що дозволяє своєчасно виявляти перевантаження, порушення змащення, електричні несправності та інші теплові аномалії [12, 13, 20]. Поряд із традиційними фізичними методами все більшого значення набувають електронні системи бортової діагностики (OBD), що використовуються у транспортних засобах. Системи OBD-II забезпечують зчитування кодів несправностей електронних блоків управління, контроль параметрів двигуна, паливної системи, запалювання та систем очищення вихлопних газів [17-19]. Їх застосування дозволяє зменшити час пошуку несправностей та підвищити точність діагностики. Незважаючи на розвиток високотехнологічних методів, візуальна та слухова діагностика залишаються важливими на етапах попереднього огляду техніки [8]. Вони базуються на досвіді спеціаліста, який за зміною шумів, вібрацій, запаху чи зовнішнього вигляду вузлів може зробити попередній висновок про стан обладнання. Сучасні дослідження також зосереджені на інтеграції машинного навчання, нейронних мереж і цифрової обробки сигналів для автоматизації процесу виявлення несправностей та прогнозування відмов [6, 14, 16]. Використання **комплексного підходу**, який об'єднує традиційні, сенсорні та аналітичні методи діагностики, розглядається як основний напрям подальшого розвитку галузі [1, 4, 5].

3. Мета роботи є узагальнення та систематизація сучасних методів технічної діагностики машин, а також визначення напрямів їх подальшого розвитку з урахуванням тенденцій цифровізації, автоматизації та використання інтелектуальних технологій.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких основних завдань:

- проаналізувати існуючі методи діагностики машин -візуальні, слухові, вібраційні, акустичні, термографічні, електричні та електронні (OBD);
- визначити переваги, обмеження та сфери ефективного застосування кожного методу;
- дослідити можливості поєднання традиційних і сучасних діагностичних підходів у рамках комплексних систем моніторингу;
- розглянути перспективи впровадження технологій машинного навчання та інтелектуального аналізу даних у процес діагностування;
- сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення точності та оперативності діагностики машин і механізмів.

4. Обговорення результатів дослідження. Проведений аналіз показав, що кожен із розглянутих методів технічної діагностики має свої переваги та обмеження, а їх ефективність значною мірою залежить від умов експлуатації машин, типу обладнання та характеру можливих дефектів.

Візуальна діагностика є одним із найстаріших і водночас найпоширеніших методів оцінювання технічного стану машин. Вона ґрунтується на зоровому огляді зовнішніх

поверхонь, з'єднань, елементів кріплення, ущільнень, мастильних матеріалів, корпусних деталей тощо. Основне завдання - виявлення видимих ознак дефектів:

- тріщин, вм'ятин, викришувань, деформацій;
- слідів витoku мастила або охолоджувальної рідини;
- зміни кольору поверхонь, нагару, іржі;
- порушень з'єднань, розхитування деталей, ослаблення болтів;
- механічного зносу робочих поверхонь.

Для підвищення точності огляду використовуються ендоскопи, лупи, мікроскопи, борові камери, а також індикаторні фарби або ультрафіолетові барвники, що дозволяють локалізувати тріщини та мікродефекти. У стандартах ISO 9712 та ДСТУ EN 1330 -10 - 2017 візуально-оптична діагностика (VT - *Visual Testing*) класифікується як окремий неруйнівний метод контролю.

У спрощеному вигляді ефективність (1) візуального контролю можна описати як функцію:

$$E = f(A, L, O), \quad (1)$$

де A - освітленість зони огляду (лк), L - рівень контрастності об'єкта, O - досвід оператора.

За даними експериментальних досліджень, зниження освітленості нижче 300 лк зменшує ймовірність виявлення дефекту на 25-30 %.

Слухова діагностика базується на аналізі акустичних сигналів, що виникають під час роботи машин. Оператор визначає характерні зміни у шумі, стукоті чи свисті, які свідчать про порушення в роботі вузлів - підшипників, редукторів, клапанів, поршнів тощо. Типові ознаки дефектів:

- рівномірне гудіння - нормальний стан;
- періодичний стукіт - розбаланс або люфт у підшипнику;
- скрегіт або шелест - знос зубчастої передачі;
- підвищений шум і вібрація - порушення центрування або осевого зазору.

У промислових умовах слухова діагностика може проводитися не лише «на слух», а й із застосуванням електронних стетоскопів, шумомірів або аналізаторів звукових сигналів, які дозволяють вимірювати частоту, амплітуду та гармонічний склад звуку. Спектр акустичних коливань $S(f)$ часто використовується (2) для порівняння з еталонними характеристиками:

$$S(f) = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) e^{-j2\pi ft} dt, \quad (2)$$

де $s(t)$ - сигнал звуку, T - час спостереження, f - частота.

Відхилення амплітуд у спектрі може вказувати на певний тип несправності.

Переваги цих методів простота, швидкість і низька вартість; можливість застосування без демонтажу обладнання; ефективність при попередньому контролі перед запуском або після ремонту.

Недоліки: суб'єктивність оцінювання; низька чутливість до прихованих дефектів; залежність від досвіду спеціаліста та умов спостереження.

Загалом, візуальна та слухова діагностика є невід'ємною частиною комплексної системи технічного контролю. Їх результати використовуються для попереднього виявлення несправностей і визначення доцільності проведення глибших інструментальних методів - вібраційного, термографічного або електронного аналізу.

Вібраційна діагностика - один із найефективніших і найпоширеніших методів технічної діагностики машин, що ґрунтується на аналізі параметрів механічних коливань елементів обладнання під час його роботи. Вона дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях розвитку, не зупиняючи агрегат, і є базою для побудови систем моніторингу технічного стану.

Основна ідея методу полягає в тому, що порушення кінематичних і динамічних характеристик вузлів (зношення підшипників, розбаланс, перекося, люфти тощо) призводить

до появи специфічних змін у вібраційному сигналі, які можна кількісно виміряти та ідентифікувати.

Принцип і фізичні основи. Рух будь-якої точки машини можна описати рівнянням гармонічних коливань (3):

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

де A - амплітуда вібрації, $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, φ - початкова фаза.

Реальний сигнал, як правило, є сумою гармонічних компонентів різних частот (4):

$$x(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

Для переходу до частотної області використовується швидке перетворення Фур'є (5), що дозволяє побудувати амплітудно-частотний спектр $X(f)$:

$$X(f) = \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (5)$$

Аналіз спектра вібрацій дає змогу виявляти характерні піки, пов'язані з частотами обертання валів, зубчастих коліс або дефектних елементів підшипників.

Основні параметри вимірювання. Під час діагностики зазвичай реєструють три основні параметри:

- вібраційне прискорення $a(t)$, м/с²;
- вібраційна швидкість $v(t)$, мм/с;
- вібраційне зміщення $x(t)$, мкм.

Ці параметри взаємопов'язані співвідношеннями (6):

$$v(t) = \int a(t) dt, x(t) = \int v(t) dt. \quad (6)$$

Для оцінки стану використовують ефективні (7) або пікові значення амплітуди, наприклад:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (7)$$

Аналіз спектральних характеристик коливань дає змогу ідентифікувати типові несправності обертових вузлів машин, основні з яких наведено в табл.1.

Таблиця 1. Типові дефекти, які визначаються методом вібродіагностики

Table 1. Typical defects determined by the vibration diagnostics method

Тип дефекту	Характерні ознаки у спектрі
Розбаланс	Підвищений рівень вібрацій на частоті обертання ротора ($1 \times f_{rot}$)
Неспіввісність валів	Комбінації частот $1 \times f_{rot}$ та $2 \times f_{rot}$
Знос підшипників	Широкосмуговий шум, піки на частотах BPFO, BPFI, BSF
Дефекти зубчастих передач	Гармоніки частоти зачеплення f_{mesh}
Люфти та ослаблення кріплення	Нерегулярні імпульси, низькочастотні коливання

Частоти підшипникових дефектів розраховуються за формулами (8-10) :

$$BPFO = \frac{n}{2} f_{rot} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right), \quad (8)$$

$$BPFI = \frac{n}{2} f_{rot} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right), \quad (9)$$

$$BSF = \frac{D}{2d} f_{rot} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right) \quad (10)$$

де n - кількість тіл кочення, f_{rot} - частота обертання вала, d - діаметр тіла кочення, D - діаметр кола, по якому розташовані тіла кочення, θ - кут контакту.

Інструментальне забезпечення. Для вимірювання використовуються віброметри, акселерометри, аналізатори спектра, лазерні віброметри та системи безперервного моніторингу. У промислових системах застосовуються бездротові датчики та алгоритми автоматичного аналізу спектрів у реальному часі.

Переваги методу: висока чутливість до зародження дефектів; можливість виявлення прихованих несправностей без демонтажу; об'єктивність вимірювань і можливість автоматизації; використання в системах прогнозування ресурсу.

Недоліки: потреба у спеціальному обладнанні та кваліфікованому персоналі; вплив зовнішніх факторів (шум, резонанси, монтаж); складність інтерпретації при багатокомпонентних коливаннях.

Висновок щодо методу. Вібраційна діагностика є основою для створення інтелектуальних систем технічного моніторингу. Її ефективність зростає при поєднанні з методами термографії, OBD-контролю та машинного навчання, що дозволяє переходити від реактивного до прогнозного технічного обслуговування.

Акустична діагностика - це метод технічного контролю, що ґрунтується на аналізі звукових хвиль та акустичних емісій, які виникають у процесі роботи машин і механізмів. Зміни у спектрі та амплітуді акустичних сигналів свідчать про порушення у структурі матеріалу або неправильну роботу окремих вузлів.

Метод дозволяє виявляти механічні, гідравлічні, пневматичні й електричні дефекти без зупинки обладнання та без його розбирання, що робить його важливою складовою неруйнівного контролю.

Фізичні основи методу. Будь-який механічний дефект (удар, тріщина, тертя, зіткнення частин) є джерелом акустичної енергії, яка поширюється у вигляді пружних хвиль (11). Основними параметрами, що аналізуються під час діагностики, є:

- звуковий тиск $p(t)$, Па;
- звукова інтенсивність I , Вт/м²;
- рівень звукового тиску в децибелах:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p(t)}{p_0} \right) \quad (11)$$

де $p_0 = 2 \times 10^5$ Па - порогове значення звукового тиску для людини.

Вимірний сигнал перетворюється в частотну область за допомогою швидкого перетворення Фур'є (12) для побудови спектра:

$$P(f) = \int_0^T p(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (12)$$

Отриманий спектр дозволяє визначити характерні частоти дефектів, гармоніки та зони надлишкового шуму.

Акустична емісія. Окремим напрямом методу є акустико - емісійна діагностика, яка ґрунтується на реєстрації короткочасних імпульсів, що виникають під час зародження та розвитку мікротріщин, корозійних процесів або пластичної деформації матеріалу.

Типовий сигнал акустичної емісії описується параметрами:

- амплітуда A ;
- тривалість t ;
- кількість імпульсів за певний період часу N ;
- енергія сигналу $E = \int p^2(t) dt$.

Підвищення частоти спрацьовувань датчиків акустичної емісії свідчить про активізацію процесів руйнування матеріалу.

Практичне застосування акустичного методу ефективно використовуються для: діагностики підшипників, редукторів, турбін, насосів та двигунів внутрішнього згорання; контролю герметичності пневматичних і гідравлічних систем; виявлення витоків газу або

пари; моніторингу зварних швів, резервуарів і трубопроводів; контролю стану ізоляції та високовольтного обладнання.

У транспортній техніці акустична діагностика використовується для оцінки роботи клапанного механізму, запалювання, систем упорскування палива, а також для розпізнавання шумів двигуна за допомогою цифрових алгоритмів.

Для характеристики джерел вібрацій і шумів різної природи доцільно використовувати частотний аналіз сигналів, типові діапазони яких подано в табл.2.

Таблиця 2. Типові частотні діапазони дефектів

Table 2. Typical frequency ranges of defects

Тип джерела	Частотний діапазон, Гц	Характер сигналу
Нормальна робота підшипника	200-2000	Рівномірний гул
Мікротріщини	5000-50000	Короткі імпульси
Витоки повітря	20000-100000	Високочастотне шипіння
Детонація двигуна	4000-7000	Періодичні вибухоподібні імпульси

Інструментальні засоби. Для реалізації методу використовуються: мікрофони широкого діапазону частот, ультразвукові датчики, цифрові аналізатори спектра, електронні стетоскопи, акустичні камери, що дозволяють локалізувати джерело звуку в просторі.

Сучасні портативні системи поєднують вимірювання звуку та вібрацій із цифровою обробкою сигналу й автоматичною ідентифікацією дефектів.

Переваги акустичної діагностики. Можливість раннього виявлення дефектів, ще до появи механічних пошкоджень; висока чутливість до мікротріщин і витоків; безконтактність методу; застосування у важкодоступних місцях і на рухомих об'єктах; можливість поєднання з іншими методами (вібраційним, термографічним).

Недоліки: чутливість до зовнішніх шумів і перешкод; необхідність фільтрації сигналів і цифрової обробки; потреба у кваліфікованому аналізі спектрів.

Висновок щодо методу. Акустична діагностика є одним із найбільш інформативних засобів раннього виявлення дефектів і оцінювання ступеня пошкодження вузлів машин. У поєднанні з методами вібраційного аналізу та термографії вона забезпечує комплексну оцінку технічного стану обладнання. Перспективним напрямом розвитку є використання штучного інтелекту та нейронних мереж для автоматичної ідентифікації типів дефектів за акустичним підписом.

Термографічні методи. Термографічна діагностика (або інфрачервона термографія) - це метод неруйнівного контролю, який ґрунтується на вимірюванні та аналізі розподілу температури на поверхні машин і механізмів. Вона дозволяє виявляти аномалії теплових полів, що виникають унаслідок зносу, тертя, перевантаження, порушення ізоляції або електричних несправностей.

Суть методу полягає у реєстрації інфрачервоного випромінювання, яке випускають тіла, температура яких вища від абсолютного нуля. Отримані дані перетворюються у термограми - зображення, на яких температура відображається у вигляді кольорової карти або ізотерм.

Фізичні основи методу. Кількість теплової енергії, яку випромінює поверхня, описується законом Стефана – Больцмана (13):

$$E = \varepsilon\sigma T^4 \quad (13)$$

де E - щільність потоку випромінювання, Вт/м²; ε - коефіцієнт випромінювання поверхні (0-1); $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) - стала Стефана - Больцмана; T - абсолютна температура тіла, К.

Оскільки більшість поверхонь машин є неідеальними випромінювачами, при вимірюваннях необхідно враховувати їхню емісійність (ε) - для сталі вона зазвичай становить 0,7-0,9 для алюмінію - 0,3-0,5.

Температурне поле на термограмі описується функцією (14)

$$T = f(x, y) \quad (14)$$

де x, y - координати поверхні.

Теплові аномалії виявляються за локальним відхиленням ΔT від середнього значення (15):

$$\Delta T = T_{loc} - T_{avg} \quad (15)$$

Застосування термографічних методів. Термографічна діагностика активно використовується в різних галузях промисловості для: виявлення перегрівів підшипників, валів, редукторів; контролю стану систем змащення (втрата мастила викликає локальне підвищення температури); оцінювання роботи електродвигунів, трансформаторів, контактів і з'єднань; виявлення дефектів ізоляції, обривів жил, коротких замикань; моніторингу термічних процесів у гальмівних системах і шасі транспортних засобів; виявлення дефектів у композитних матеріалах (деламінація, розшарування).

У машинобудуванні та енергетиці термографія застосовується як оперативний метод попереднього контролю, особливо у поєднанні з іншими діагностичними підходами.

Типові приклади термограм:

- Нормальний стан: рівномірний розподіл температури, відсутність яскравих «гарячих плям».
- Початковий дефект: локальна зона підвищеної температури (на 3–5 °С вище середньої).
- Розвинений дефект: різкий температурний градієнт ($\Delta T > 10$ °С), часто супроводжується шумом або вібрацією.

На рисунках термографічних зображень гарячі ділянки позначаються червоним/білим кольором, холодні - синім/зеленим.

Приклад кількісної оцінки. Для порівняльного аналізу стану використовують індекс теплової аномалії (16):

$$K_T = \frac{\Delta T}{T_{avg}} \times 100\% \quad (16)$$

де ΔT - локальне перевищення температури; T_{avg} - середня температура поверхні.

Якщо $K_T > 5\%$, вузол вважається потенційно несправним і потребує детальнішої перевірки.

Інструментальні засоби. Використовуються інфрачервоні термографічні камери (стаціонарні або портативні):

- *FLIR E8-XT, Fluke Ti480, Testo 872, HIKMICRO M20*;
- спектральний діапазон 7–14 мкм;
- температурна роздільна здатність - до 0.05 °С;
- можливість підключення до ПК для побудови 3D-теплових карт.

У сучасних системах термографія інтегрується з вібраційною та акустичною діагностикою у комплексні системи моніторингу (наприклад *Siemens SIMATIC Condition Monitoring, SKF Enlight Centre*).

Переваги термографічних методів. Безконтактність і безпечність вимірювань; можливість роботи на відстані і під час руху; візуалізація дефектів у реальному часі; висока точність і швидкість обстеження; сумісність з цифровими системами обробки даних.

Недоліки: чутливість до зовнішніх умов (освітлення, вітер, вологість); складність інтерпретації при багатошарових конструкціях; потреба у калібруванні емісійності матеріалів.

Висновок щодо методу. Термографічні методи є одними з найінформативніших засобів ранньої діагностики у машинобудуванні та енергетиці. Вони дозволяють виявляти дефекти до появи механічних пошкоджень, що значно зменшує ризик аварій і простоїв.

Поєднання термографії з вібраційною, акустичною та OBD-діагностикою забезпечує комплексний підхід до оцінки технічного стану машин. Перспективним напрямом розвитку є застосування тепловізорів з нейронною обробкою зображень, які автоматично класифікують типи дефектів за формою і температурним профілем.

Електронні системи діагностики (OBD), англ. *On-Board Diagnostics* - це інтегрована система контролю технічного стану машин і транспортних засобів, яка забезпечує автоматичне виявлення, реєстрацію та передачу інформації про несправності електронних і механічних систем.

Основне призначення OBD - забезпечити надійну, безпечну та екологічну експлуатацію техніки шляхом постійного моніторингу роботи двигуна, трансмісії, паливної системи, систем упорскування, запалювання, каталізаторів і датчиків.

Загальна архітектура системи OBD. Типова структура системи включає такі основні компоненти:

- електронний блок керування (ECU) - мікропроцесорний пристрій, що приймає сигнали від сенсорів, аналізує їх, формує коди несправностей (DTC) і зберігає їх у пам'яті;
- датчики - пристрої, що вимірюють температуру, тиск, рівень кисню, частоту обертання, положення дросельної заслінки, швидкість тощо;
- виконавчі механізми - інжектори, електромагнітні клапани, котушки запалювання, приводи рециркуляції газів;
- комунікаційні шини (CAN, LIN, FlexRay, DoIP) - канали обміну діагностичними даними між блоками;
- OBD-II роз'єм (SAE J1962) - стандартний інтерфейс для підключення зовнішніх діагностичних пристроїв.

Під час роботи ECU постійно порівнює отримані значення з еталонними, визначає відхилення та за потреби генерує код несправності DTC (Diagnostic Trouble Code). Користувач отримує попередження через індикатор MIL (*Malfunction Indicator Lamp*) на панелі приладів.

Формат і структура діагностичних кодів DTC

Кожен код несправності має структуру PXXXX, де P - Powertrain (силовий агрегат); B - Body (кузов); C - Chassis (шасі); U - Network (мережеві системи).

Приклади:

- P0301 - пропуски займання у першому циліндрі;
- P0171 - збіднена паливна суміш;
- C1234 - несправність датчика швидкості колеса;
- U0100 - втрата зв'язку з ECU двигуна.

Коди зчитуються через роз'єм OBD-II за допомогою діагностичного сканера або комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням (*Torque Pro, ScanMaster, Bosch KTS, Delphi DS150E* тощо).

Передача даних через комунікаційну шину CAN системи OBD-II у більшості сучасних машин працюють на основі шини CAN (Controller Area Network), яка забезпечує високошвидкісний обмін даними (250–500 кбіт/с) між мікроконтролерами без центрального комп'ютера.

Фізичний рівень шини - диференціальний, що гарантує захист від електромагнітних перешкод.

CAN складається з двох сигнальних ліній:

- CAN High (CAN H) - лінія високого потенціалу (~3.5 В);
- CAN Low (CAN L) - лінія низького потенціалу (~1.5 В);
- іноді використовується CAN Middle (CAN M) - опорна або діагностична лінія (≈2.5 В), для балансування або синхронізації в складних системах.

Диференціальний сигнал визначається як (17):

$$\Delta V_{CAN} = V_{CAN H} - V_{CAN L} \quad (17)$$

- доміантний рівень (логічний «0») $\rightarrow \Delta V_{CAN} \approx 2B$;

- рецесивний рівень (логічна «1») $\rightarrow \Delta V_{CAN} \approx 0B$.

Така система забезпечує надійність комунікації навіть за наявності електричних шумів або довгих кабелів.

Протоколи діагностичного обміну через CAN на транспортному рівні OBD використовує стандарти:

- ISO 15765-4 (CAN OBD-II) - основний стандарт для запитів і відповідей ECU;

- SAE J2284 - визначає фізичний рівень і швидкість обміну;

- ISO 14229 (UDS - Unified Diagnostic Services) - протокол сервісних запитів високого рівня, що використовується для перепрограмування, тестування та моніторингу.

Приклад запиту параметра двигуна (PID):

[02][01][0C] \Rightarrow запит обертів двигуна (RPM).

Відповідь ECU (18):

$$[04] [41] [0C] [1A] [F8] \Rightarrow RPM = \frac{(1A \times 256 + F8)}{4} = 6904 \text{ об/хв} \quad (18)$$

Технологія DoIP (Diagnostics over IP), нове покоління систем діагностики ґрунтується на стандарті ISO 13400 - DoIP (Diagnostics over Internet Protocol), який забезпечує обмін даними між ECU та діагностичними пристроями через Ethernet.

Переваги DoIP:

- швидкість передачі до 100 Мбіт/с;

- підтримка паралельної роботи кількох пристроїв;

- віддалена діагностика через Wi-Fi, 4G/5G;

- сумісність із протоколом UDS поверх TCP/IP.

DoIP використовується у новітніх платформах (*Mercedes-Benz Xentry, BMW ISTA, VW ODIS, Volvo VIDA*), а також у промислових машинах із підключенням до хмарних систем.

Вона є базовим компонентом концепції Connected Vehicle, у якій транспортний засіб є частиною мережевої інфраструктури IoT.

Інформаційна модель та алгоритм виявлення несправностей.

Стан системи можна представити у вигляді вектора (19):

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (19)$$

де x_i - значення певного параметра, а $x_{i,ref}$ - його еталон.

Критерій виявлення несправності (20):

$$|x_i - x_{i,ref}| > \Delta_i \Rightarrow \text{генерується код DTC.} \quad (20)$$

Виявлені коди реєструються в пам'яті ECU, а при перевищенні порогу серйозності активується індикатор MIL.

Інтеграція з іншими системами діагностики. Сучасні системи OBD інтегруються з вібраційною, акустичною та термографічною діагностикою через CAN - або Ethernet - шини. Це створює єдину цифрову модель технічного стану машини, яка дозволяє:

- проводити діагностику без зупинки агрегату;

- аналізувати динаміку параметрів у реальному часі;

- прогнозувати відмови (Predictive Maintenance);

- формувати звіти та графіки температур, вібрацій, тиску, обертів.

Переваги та обмеження методу.

Переваги:

- автоматичний моніторинг усіх електронних систем;

- швидкий доступ до діагностичних даних через CAN або DoIP;

- можливість дистанційної перевірки та оновлення ПЗ ECU;

- сумісність із мобільними додатками й телематичними системами;

- висока завадостійкість та точність передавання даних.

Недоліки:

- обмеження у виявленні чисто механічних дефектів;
- залежність від коректності калібрування датчиків і прошивки ECU;
- потреба у спеціалізованому обладнанні та сертифікованому доступі для DoIP.

Висновок щодо методу. Сучасні електронні системи діагностики OBD, засновані на шинах CAN H, CAN L, CAN M та мережевих технологіях DoIP, формують ядро інтелектуального контролю технічного стану машин. Вони забезпечують автоматичну ідентифікацію несправностей, дистанційний моніторинг і інтеграцію з іншими методами - вібраційним, акустичним та термографічним.

У поєднанні з аналітичними алгоритмами та системами машинного навчання OBD-технології є базою для реалізації Smart Maintenance - технічного обслуговування за фактичним станом, що мінімізує простой, підвищує безпеку й ефективність експлуатації машин.

Електронні системи діагностики та осцилографічні методи є невід'ємним доповненням до систем OBD-II / CAN / DoIP і використовуються для детального аналізу електричних сигналів у реальному часі.

Якщо OBD-система виявляє наявність несправності, то осцилограф дозволяє візуалізувати форму сигналу, визначити її причину та локалізувати дефект на рівні елементів - датчика, приводу або ланцюга живлення.

Осцилограф реєструє залежність напруги від часу (21):

$$U = f(t) \quad (21)$$

що дозволяє оцінювати:

- форму імпульсу;
- частоту повторення;
- амплітуду, фазу, симетрію сигналу;
- час наростання та спаду фронтів;
- наявність паразитних коливань і шумів.

Принцип роботи та можливості даного методу перетворюють електричні коливання на графічне зображення сигналу на екрані.

Цифрові осцилографи (DSO) використовують високошвидкісні АЦП для оцифрування сигналів та їх подальшої обробки.

Основні параметри приладу:

- смуга пропускання (до 100 МГц і більше для автомобільних систем);
- частота дискретизації (від 1 до 10 Гз/с);
- кількість каналів (2-8);
- пам'ять запису (до декількох Мбайт).

Типові сфери застосування осцилографічної діагностики:

- перевірка сигналів датчиків (колінчастого вала, розподільного вала, дросельної заслінки, ABS);
- оцінка форми імпульсів упрскування палива;
- діагностика систем запалювання (DIS, COP);
- вимірювання падіння напруги на масі;
- контроль синхронізації фаз ГРМ;
- дослідження CAN, LIN і FlexRay-сигналів у фізичному рівні.

Осцилографи для систем CAN і OBD при роботі з шинами CAN H / CAN L / CAN M дозволяє:

- візуально перевірити рівень сигналів для (CAN H~3.5 В, для CAN L~1.5 В);
- побачити диференціальний сигнал $\Delta V = V(\text{CANH}) - V(\text{CANL})$;
- оцінити симетрію, спотворення або відбиття сигналів (ознаки короткого замикання або обриву);

- перевірити узгодження лінії (термінатори 120 Ом);
- діагностувати електричні шуми, наводки, погані контакти.

Приклад вимірювання:

$\Delta V_{CAN} \approx 2V \Rightarrow$ нормальна передача;

$\Delta V_{CAN} < 1V \Rightarrow$ порушення лінії або термінатора

Осцилографічний аналіз у діагностиці двигунів за допомогою автомобільних осцилографів (наприклад *PicoScope*, *Hantek*, *Autel*, *Launch*, *Bosch FSA*) можливо:

- знімати осцилограми струму стартера для аналізу компресії по циліндрах;
- оцінювати синхронізацію сигналів датчиків колінвала і розподільного вала;
- перевіряти роботу форсунок і катушок запалювання;
- вимірювати напругу генератора, коливання живлення ECU, просідання напруги при навантаженні.

Типовий осцилографічний сигнал системи запалювання має структуру: імпульс заряду катушки (до 8 мс); стрибок напруги пробою (до 15–25 кВ); імпульс горіння (1–2 мс); коливання гасіння.

Порівняння форм сигналів дозволяє визначити несправності у катушці, свічці або електронному ключі.

Математичні параметри аналізу сигналів. Для кількісного аналізу осцилограм використовуються такі показники (22-24):

$$U_{PP} = U_{max} - U_{min} \text{ (амплітуда пік – пік)} \quad (22)$$

$$T = \frac{1}{f} \text{ (період сигналу)} \quad (23)$$

$$U_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \text{ (ефективне значення)} \quad (24)$$

Ці параметри застосовуються для автоматичного порівняння із еталонними осцилограмами, збереженими у базі даних діагностичного комплексу.

Переваги осцилографічної діагностики: висока точність і миттєве відображення процесів; можливість дослідження сигналів, які не контролюються OBD; оцінка динаміки у реальному часі; універсальність - застосування до будь-яких електронних систем; можливість збереження і порівняння осцилограм для аналізу тенденцій деградації.

Недоліки: потреба у кваліфікованому персоналі; складність інтерпретації складних сигналів; вплив шумів і неправильного підключення щупів; вартість високоточних приладів.

Осцилографічні методи - це деталізуючий рівень електронної діагностики, який дає змогу не лише виявити несправність, а й визначити її характер, фазу, тривалість та місце виникнення. У поєднанні з OBD, CAN і DoIP осцилографічна діагностика забезпечує повний контроль електронних і електромеханічних процесів у машині.

Вона є незамінним інструментом для комплексного технічного моніторингу, калібрування та верифікації результатів, отриманих іншими методами (вібраційним, акустичним, термографічним).

5. Висновки: У ході дослідження розглянуто широкий спектр сучасних методів технічної діагностики машин, які охоплюють як традиційні фізичні методи контролю (візуальні, слухові, вібраційні, акустичні, термографічні), так і інтелектуальні електронні системи OBD, CAN, DoIP та осцилографічні засоби аналізу сигналів.

Встановлено, що візуальна та слухова діагностика залишаються ефективними при оперативному контролі стану техніки та є першочерговими етапами виявлення дефектів. Вібраційна та акустична діагностика забезпечують можливість раннього виявлення механічних пошкоджень і ідентифікації джерел несправностей за частотними характеристиками сигналів.

Термографічні методи дають змогу виявляти теплові аномалії, спричинені перевантаженнями, зносом або електричними дефектами, без демонтажу обладнання.

Електронні системи OBD, CAN, DoIP формують основу цифрової технічної діагностики нового покоління, що забезпечує автоматичне виявлення несправностей, збереження кодів помилок (DTC), дистанційний моніторинг та інтеграцію з телематичними системами.

Осцилографічна діагностика доповнює ці технології, дозволяючи проводити детальний аналіз електричних і інформаційних сигналів у реальному часі, підтверджувати результати OBD та точно локалізувати джерело дефекту.

Загальний аналіз показав, що жоден із методів діагностики не є універсальним. Найвищу ефективність забезпечує комплексний підхід, який об'єднує дані від кількох джерел - сенсорів, вібраційних і теплових датчиків, акустичних систем, осцилографів та електронних контролерів - у єдину систему технічного моніторингу.

Поєднання методів дозволяє не лише виявляти дефекти, а й прогнозувати їх розвиток, що є ключовою умовою переходу до систем обслуговування за технічним станом (Condition-Based Maintenance, CBM) і інтелектуального обслуговування (Smart Maintenance).

Подальший розвиток технічної діагностики машин пов'язаний з:

- впровадженням штучного інтелекту та машинного навчання для автоматичної інтерпретації сигналів;
- інтеграцією систем у єдині мережеві платформи моніторингу (IoT, DoIP, Cloud Diagnostics);
- розробленням адаптивних сенсорних мереж для контролю параметрів у реальному часі;
- підвищенням енергоефективності, безпеки та надійності машин за рахунок постійного діагностичного супроводу.

Отже, сучасні методи технічної діагностики є багатофункціональним інструментом управління життєвим циклом машин, який забезпечує зменшення витрат на ремонт, підвищення надійності, продовження ресурсу та створює технологічну базу для індустрії і цифрового технічного обслуговування майбутнього.

Список використаних джерел:

1. Мигаль В. Д., Аргун Щ. В. *Вібраційна діагностика машин. Проектування, виготовлення, експлуатація* : монографія. 2-е вид., перероб. і доп. Харків : Майдан, 2024. – 440 с.
2. Гребенюк В. М. *Основи технічної діагностики машин* : навч. посібник. Харків : ХНАДУ, 2018. – 268 с.
3. Поліщук С. І. *Діагностика та технічне обслуговування транспортних засобів* : навч. посібник. Київ : Арістей, 2019. – 276 с.
4. Гнатенко С. В., Задорожний О. П. Осцилографічна діагностика електронних систем автомобіля // *Вісник НТУ «ХПИ»*. Серія: *Транспортне машинобудування*. – 2021. – № 4 (1382). – С. 72–80.
5. Мигаль В. Д., Аргун Щ. В., Пшеничний О. О. Розвиток систем технічної діагностики сільськогосподарських машин // *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. – 2023. – № 25. – С. 44–53.
6. Клименко О. В., Федоренко С. В. Використання штучного інтелекту для прогнозування діагностики промислового обладнання // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2023. – Т. 4, № 10. – С. 43–52.
7. Сивак М. В., Чернега Д. В. Віброакустична діагностика технічного стану машин // *Науковий вісник НТУ «Львівська політехніка»*. – 2020. – № 869. – С. 112–118.
8. ДСТУ EN 1330-10:2017. *Неруйнівний контроль. Терміни. Частина 10. Візуальний контроль*. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 28 с.
9. Randall, R. B. (2022). Development of vibration-based condition monitoring methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162, 107013.
10. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
11. Li, Y., & He, D. (2012). Rotating machinery fault detection using acoustic emission signals. *Applied Acoustics*, 73(8), 812–823.
12. Medvedev, A. E., & Gusev, V. V. (2020). Thermographic diagnostics of mechanical systems. *Procedia Engineering*, 206, 1525–1532.

13. Migdalski, J., & Krawczyk, M. (2020). Use of infrared thermography in the condition monitoring of mechanical systems. *Measurement*, 165, 108112.
14. Dybala, J., & Radkowski, S. (2021). Vibration signal analysis in machine fault diagnosis using FFT and envelope analysis. *Diagnostyka*, 22(2), 57–64.
15. Holroyd, T. J. (2018). Acoustic emission methods for machine fault detection. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(4), 88.
16. Gao, Z., Cecati, C., & Ding, S. X. (2015). A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3757–3767.
17. Li, X., & Wang, Y. (2022). Vehicle fault diagnosis based on OBD-II data using machine learning. *IEEE Access*, 10, 20348–20359.
18. Wang, S., & Li, J. (2021). Diagnostics over IP (DoIP) communication for vehicle systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(7), 6358–6367.
19. Brodny, J., & Tutak, M. (2020). Analysis of OBD-II system applications for internal combustion engine diagnostics. *Energies*, 13(4), 978.
20. Maldague, X. (2019). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing* (2nd ed.). New York: Wiley.

References:

1. Migal, V. D., & Argun, Sh. V. (2024). *Vibration diagnostics of machines: Design, manufacturing, operation* (2nd ed., revised and expanded). Kharkiv: Maidan. 440 p.
2. Hrebeniuk, V. M. (2018). *Fundamentals of technical diagnostics of machines*. Kharkiv: KhNADU. 268 p.
3. Polishchuk, S. I. (2019). *Diagnostics and maintenance of vehicles*. Kyiv: Aristei. 276 p.
4. Hnatenko, S. V., & Zadorozhnyy, O. P. (2021). Oscillographic diagnostics of automotive electrical systems. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Transport Engineering and Technologies*, 4(1382), 72–80.
5. Migal, V. D., Argun, Sh. V., & Pshenichnyi, O. O. (2023). Development of technical diagnostics systems for agricultural machines. *Technical Service of Agro-Industrial, Forestry and Transport Complexes*, 25, 44–53.
6. Klymenko, O. V., & Fedorenko, S. V. (2023). Application of artificial intelligence for predictive diagnostics of industrial machinery. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10), 43–52.
7. Syvak, M. V., & Cherneha, D. V. (2020). Vibroacoustic diagnostics of machine technical condition. *Scientific Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, 869, 112–118.
8. Ukrainian Research and Training Center for Standardization. (2017). *DSTU EN 1330-10:2017 — Nondestructive testing. Terminology. Part 10. Visual testing*. Kyiv: UkrNDNC. 28 p.
9. Randall, R. B. (2022). Development of vibration-based condition monitoring methods. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162, 107013, 1–12.
10. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
11. Li, Y., & He, D. (2012). Rotating machinery fault detection using acoustic emission signals. *Applied Acoustics*, 73(8), 812–823.
12. Medvedev, A. E., & Gusev, V. V. (2020). Thermographic diagnostics of mechanical systems. *Procedia Engineering*, 206, 1525–1532.
13. Migdalski, J., & Krawczyk, M. (2020). Use of infrared thermography in the condition monitoring of mechanical systems. *Measurement*, 165, 108112, 1–9.
14. Dybala, J., & Radkowski, S. (2021). Vibration signal analysis in machine fault diagnosis using FFT and envelope analysis. *Diagnostyka*, 22(2), 57–64.
15. Holroyd, T. J. (2018). Acoustic emission methods for machine fault detection. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 37(4), 88–96.
16. Gao, Z., Cecati, C., & Ding, S. X. (2015). A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques – Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(6), 3757–3767.
17. Li, X., & Wang, Y. (2022). Vehicle fault diagnosis based on OBD-II data using machine learning. *IEEE Access*, 10, 20348–20359.
18. Wang, S., & Li, J. (2021). Diagnostics over IP (DoIP) communication for vehicle systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(7), 6358–6367.
19. Brodny, J., & Tutak, M. (2020). Analysis of OBD-II system applications for internal combustion engine diagnostics. *Energies*, 13(4), 978, 1–16.
20. Maldague, X. (2019). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing* (2nd ed.). New York: Wiley. 709 p.

УДК 621.926.2

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0604>**¹Ivan Nazarenko,**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Machines and Equipment for Technological Processes, <https://orcid.org/0000-0002-1888-3687>, e-mail: nazarenko.ii@knuba.edu.ua

¹Yevhen Mishchuk,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machines and Equipment for Technological Processes, <https://orcid.org/0000-0002-7850-0975>, e-mail: mischuk.ieo@knuba.edu.ua

¹Petro Ladkin,

Postgraduate student, the Department of Machines and Equipment for Technological Processes, <https://orcid.org/0009-0006-1448-3957>, e-mail: ladkin_py-2022@knuba.edu.ua

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitryanih Sil ave., 31, Kyiv, 03037, Ukraine

MODELING THE FAILURE PROCESS OF MATERIALS WITH DIFFERENT PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES UNDER STATIC LOADING CONDITIONS

ABSTRACT. *The main technical indicator of a crushing machine is the specific energy consumption per unit of the product obtained. In connection with the development of technologies and the increase in construction volumes, engineers are faced with the task of optimizing the designs of crushing machines in order to reduce energy consumption for the process of material destruction. That is, the study of the use of various rheological models of the material in the process of crushing and taking into account the geometry of the surface of the working bodies of crushing machines is an urgent task today. The paper considers the stress and deformation patterns of various rheological models used to describe rocks under static loading conditions. The parameters of the Coulomb-Mohr rheological model and the influence of the cohesive strength and the angle of internal friction on the destruction process are analyzed. Graphs of the dependence of residual cohesion on the plastic deformation of the material are constructed under the condition of different values of the effective plastic deformation. The loading of the material by the wedge and flat profiles of the crushing plates is estimated. The dependence is given that determines the rational width of the contact surface of the crushing plates depending on the loading and the physical and mechanical properties of the contacting bodies.*

Keywords: *rheological model, finite element method, cohesion, angle of internal friction, plastic deformation, stress.*

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ ІЗ РІЗНИМИ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ В УМОВАХ СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

АНОТАЦІЯ. *Основним технічним показником дробильної машини є питома витрата енергії на одиницю отриманого продукту. У зв'язку з розвитком технологій та збільшенням обсягів будівництва, перед інженерами постає завдання оптимізації конструкцій дробильних машин з метою зменшення енерговитрат на процес руйнування матеріалу. Тобто, дослідження використання різних реологічних моделей матеріалу в процесі дроблення та врахування геометрії поверхні робочих органів дробарок є актуальним завданням сьогодення. У роботі розглянуто картини напружень та деформацій різних реологічних моделей, що використовуються для опису гірських порід в умовах статичного навантаження. Проаналізовано параметри реологічної моделі Кулона-Мора та вплив когезійної міцності та кута внутрішнього тертя на процес руйнування. Побудовано графіки залежності залишкової когезії від пластичної деформації матеріалу за умови різних значень ефективно пластичної деформації. Оцінено навантаження матеріалу клиновими та плоскими профілями дробильних плит. Наведено залежність, яка визначає раціональну ширину контактної поверхні дробильних плит залежно від навантаження та фізико-механічних властивостей контактуючих тіл.*

Ключові слова: *реологічна модель, метод скінченних елементів, когезія, кут внутрішнього тертя, пластична деформація, напруження.*

1. Problem statement. The main technical indicator of a crushing machine is the specific energy consumption per unit of the product obtained. In connection with the development of technologies and the increase in construction volumes, engineers are faced with an urgent task, which is to optimize the designs of crushing machines in order to reduce energy consumption for the process of material destruction. The study of the process of energy consumption for crushing is a rather complex task, since energy consumption depends on a number of factors (heterogeneity of a piece of material, the presence of cracks, the geometry of the surface of the piece and the crushing elements of the machine, etc.), which change during the operation of the crusher. For example, a greater amount of energy is spent on the destruction of large pieces of material than on the destruction of smaller pieces, which is associated with the presence of a significant number of cracks in large pieces. The crushing process can be described as follows. First, external forces applied to a piece of material deform and break the protruding edges of a piece of material of irregular shape. Then, after the external forces reach the strength limit of the material, it is destroyed into small pieces. To determine the energy required for grinding, four basic laws of destruction are used, depending on the conditions of the working process. In addition, there are a significant number of variations of the basic laws. However, each of the laws covers only part of the complex processes that occur during the grinding of materials and does not reflect the overall picture of destruction. Therefore, the current task today is to study the use of various rheological models of the material in the grinding process and taking into account the geometry of the surface of the working bodies of crushing machines.

2. Review of Recent Studies and Publications. In the work [1], a review of the energy laws of material destruction in accordance with different types of crushing machines is made. The disadvantage of the work is the lack of analysis of rheological models and description of the interaction of the working bodies of crushing machines with the material. In the source [2], studies of the destruction between material particles in the crushing chamber of a cone crusher are presented. The authors prove the hypothesis that the destruction of the material under compressed conditions changes the nature of the stress state, the granulometric composition of the crushing product and affects energy consumption. The disadvantage of the study is the lack of consideration of the destruction of various materials based on their rheological models and taking into account the conditions of the process and the crushing chamber of the cone crusher. In the following work [3], a model of material destruction in the crushing chamber of an impact crusher is considered. The crusher operating process is taken into account by introducing a classification function that depends on the average impact energy per unit mass, the rotor speed and the material feed rate. The disadvantages of the model are that it does not take into account the interaction of material particles with each other and the geometry of the particles. The source [4] provides a review of scientific works that consider various methods and approaches used to study the mechanism of soil failure. The review covers two areas of modeling: 1) DEM modeling of brittle soil; 2) failure of continuum models. The disadvantages include the fact that the review of failure models was performed only for soils. A numerical study of the mechanism of particle failure under load is considered in [5]. The study is more aimed at identifying the mechanisms of crack formation in the particle. Due to the use of RFPA2D, the heterogeneity of the particle is taken into account during failure. The disadvantages are that the interaction between particles, the geometry of the crushing chamber and the parameters of the crusher are not taken into account, and the problem is solved in a two-dimensional formulation. Numerical modeling of material failure using the DEM method in the crushing chamber of a jaw and cone crusher is considered in [6]. The disadvantages of the work include the use of a proprietary software product to perform DEM simulation, although on the other hand the authors state that their research code can model a significant number of particles. Another disadvantage is the lack of research on the continuum model of the material, which may be associated with the entry of a solid particle of material into the crushing chamber. In [7], studies on the destruction of rocks by various methods (compression and impact) are presented. The degree of material damage, the dependence of damage on the type of load and the impact on the final product are assessed. The disadvantages include not taking into account many processes that occur in the crushing chamber, the

destruction of particles due to interaction with each other and the rheological properties of rocks. In [8], the destruction of materials in the crushing chamber of an impact crusher is considered, in order to determine energy costs. It was established that the destruction of materials by impact with friction minimization reduces energy costs. The disadvantages include considering the destruction problem only for the impact crusher, not taking into account the geometry of the crushing chamber and the material particle.

3. Purpose of work. To determine the regularities of the destruction process of materials with different physical and mechanical properties and under conditions of different geometry of crushing plates.

4. Materials and methods. The main materials for the analysis are scientific, technical and reference literature on domestic and foreign samples of modern crushing equipment. The main methods used in the work are the use of mathematical analysis in calculating the parameters of the mechanical mode of crushing machines. To perform calculations and plot graphs, software was used Ansys 2021, Wolfram Mathematica 11 and Excel 2016.

5. Results.

Let us consider modeling of working environments using various rheological models [8]. We will take granite as the material model, and a beam on two supports with a load applied to the center as the loading scheme. The modeling process itself will be performed in the Ansys R2021 software environment.

Let us start by considering the classical model – the Hooke model. For this purpose, Ansys has a ready-made rheological model – Isotropic Elasticity. The physical properties for granite will be the following – density ($\rho = 2600 \text{ km/m}^3$), elastic modulus – 50000 MPa, Poisson's ratio – 0.27. Fig. 1, a shows the picture of stresses and deformations that occur in the experimental sample (granite). To reproduce the picture of possible stresses and deformations, a force within 30 kN was applied. The material for the wedge and supporting elements is taken as carbon steel. The stress pattern corresponds to their classical distribution under the action of a concentrated force on the elastic space.

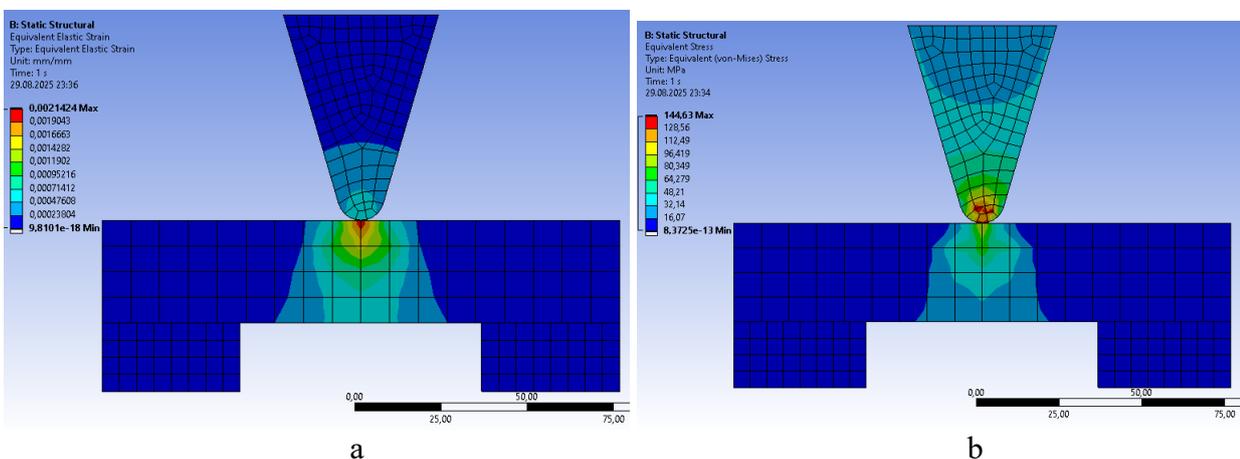


Fig. 1. FEM model of a granite sample using Hooke's rheological model:
a – deformation field; b – stress field.

The graph of the dependence of stresses on deformations is presented in Fig. 2. The graph shows a directly proportional dependence of stress on deformation.

There are no rheological models of Saint-Venant or Prandtl in the Ansys library. The solution in this case is to use the models - Bilinear Isotropic Hardening or Multilinear Isotropic Hardening. These two models reproduce the plastic behavior of the material and, under appropriate boundary conditions, completely repeat the Prandtl or Saint-Venant model.

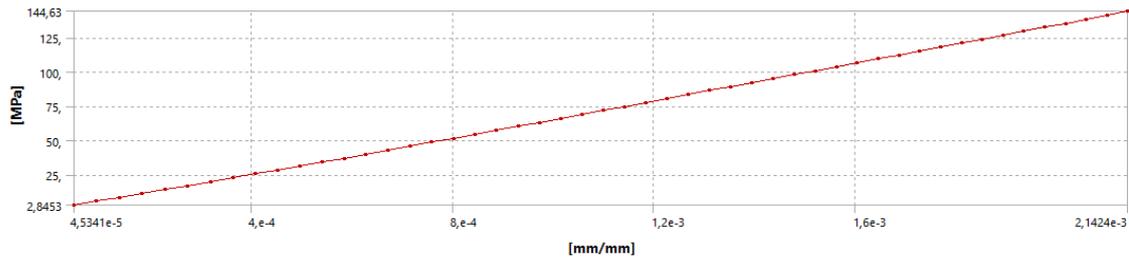


Fig. 2. Graph of the dependence of the change in stress on strain for the Hooke rheological model

To reproduce the Prandtl model, a simpler option is to use Bilinear Isotropic Hardening. The elastic and plastic deformations are shown in Fig. 3.

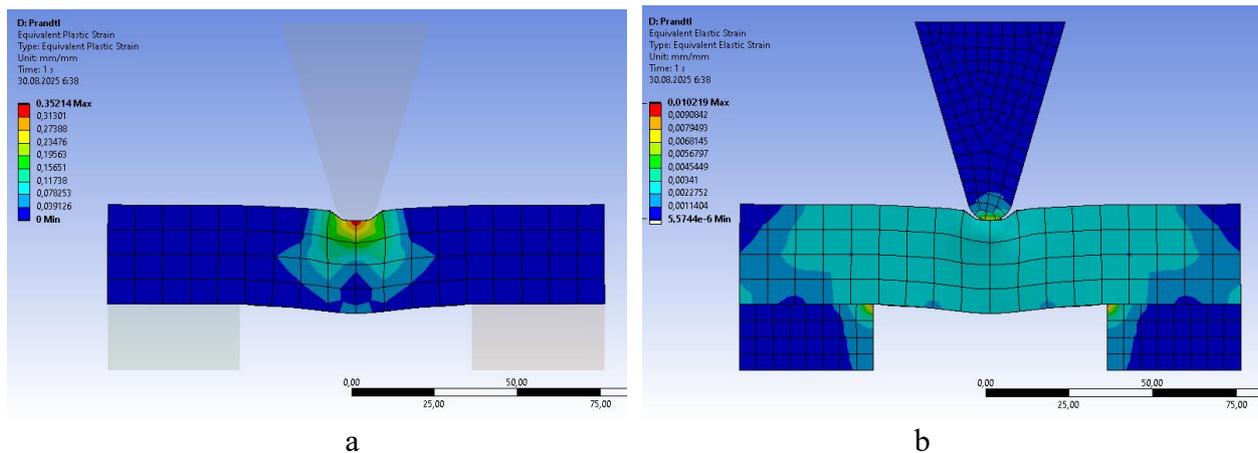


Fig. 3. FEM model that reflects deformations in a granite sample for the Prandtl rheological model: a – plastic deformations; b – elastic deformations

The stress-strain graph using the Prandtl model is presented in Fig. 4. Analyzing the plastic Prandtl model, one can notice the absence of a curve that reflects the process of unloading the material, Fig. 4. The reason is that to display such a curve in Ansys, it is necessary to use appropriate nonlinear material models. In turn, the difference between the loading curve and the unloading curve symbolizes the energy expenditure for plastic deformation, the formation of defects, and the dissipation of energy in the form of heat.

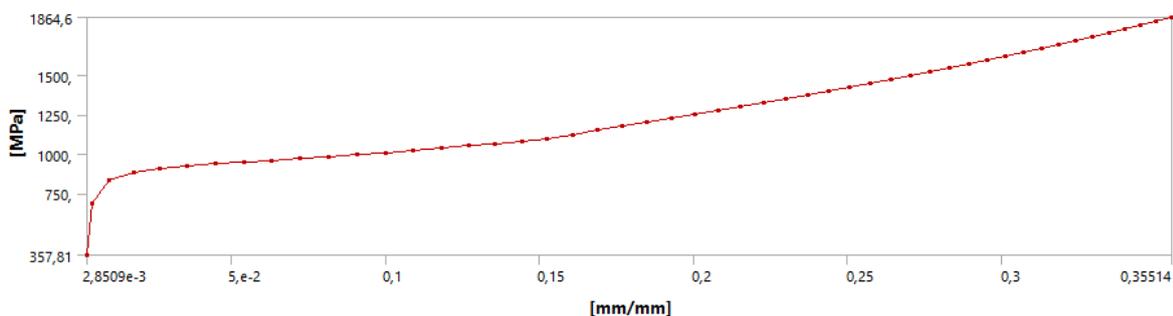


Fig. 4. Graph of the dependence of the change in stress on deformation for the Prandtl rheological model

Next, let's consider the Bingham model. Just like the Prandtl model, the pure Bingham viscoplastic model is not available in Ansys.

Common viscoplastic models available in Ansys are: 1) Anand model (modeling of high-temperature viscoplasticity); 2) Piercy model (modeling of cyclic viscoelastic hardening); 3) exponential viscous hardening model (viscoplastic hardening of materials); 4) Perzhin (general model of viscoplasticity taking into account strain rate).

Thus, to reproduce the Bingham model, it is possible to use an existing model with defined boundary conditions. The Perzhina model is best suited for these problems. To reproduce the Bingham model, it is necessary to take the parameter n (strain rate hardening exponent 1) equal to unity. The Perzhina model determines how the material develops plastic deformations and their speed, but does not give an answer where exactly the plastic deformations begin. Therefore, in this case, it is necessary to add a plastic model (bilinear isotropic hardening or multilinear isotropic hardening) to the Perzhina model.

Based on the above calculations, the Bingham viscoplastic model was calculated, the deformation and stress fields of which are presented in Fig. 5. The stress and deformation pattern was constructed for the case of applying a load of 50,000 N.

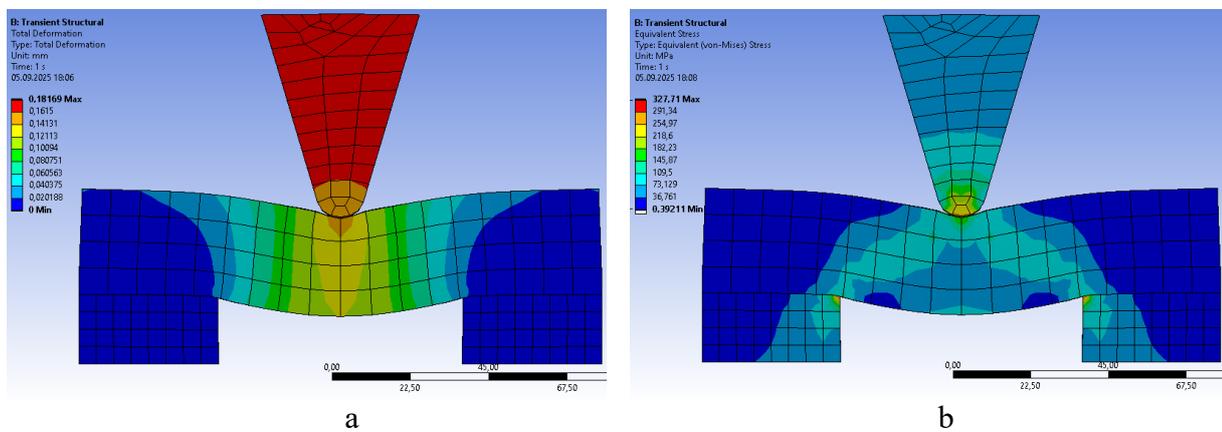


Fig. 5. FEM model that reflects the picture of deformations and stresses in a granite sample for the Bingham rheological model: a – deformation field; b – stress field

The stress-strain graph for the Bingham model is presented in Fig. 6.

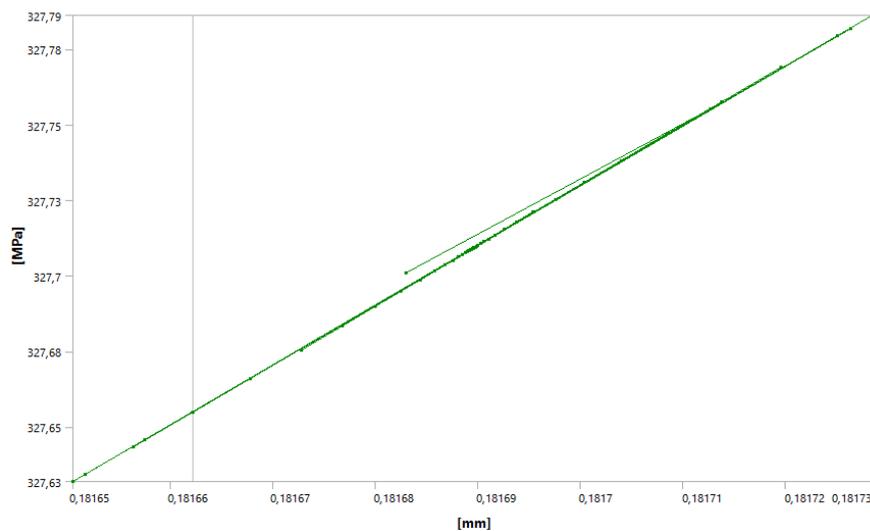


Fig. 6. Graph of the dependence of the change in stress on strain for the Bingham rheological model

It should be noted here that for a more accurate representation of the stress and strain pattern for the viscoplastic model, it is necessary to perform simulation in the transient structural module.

This is due to the fact that time dependencies are introduced in this model. It should be noted separately that in Ansys you can use the Explicit dynamic module, but its difference is that it is best suited for modeling processes with high loading rates, while transient structural is designed for modeling processes close to static.

The next step is to consider a more complex rheological model of Coulomb-Mohr. Due to the wide range of crushing machines, it is necessary to take into account, in addition to different material models, different shapes of the geometric surface of the crushing working bodies. To all this, it is necessary to add a complex loading condition in most crushing chambers of crushing machines. Let us summarize in Table 1 the physical characteristics of the studied geological rocks.

Table 1. Physical characteristics of rocks

Physical properties	Type of material			
	Marble	Granite	Gabbro	Gneiss
Initial angle of internal friction, radian	0,44156	0,89011	0,75	0,488
Initial cohesion, MPa	21,2	31.68	34,87	30.4
Dilatancy angle, radian	0,44156	0,89011	0,75	0,488
Residual angle of internal friction, radian	0.22078	0.445055	0.375	0.244
Residual cohesion, MPa	6,5	9,8	10.8	9.4
Source	[8],[9]	[8], [9],[10]	[8],[9],[10]	[8],[9]

In Table 1, the unknown parameters are: 1) the angle of internal friction; 2) cohesion. These parameters are necessary when solving the stress state problem based on the Coulomb-Mohr model. The angle of internal friction can be determined based on the following relationship:

$$\varphi = \left(\sin \left[\frac{6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}} \right] \right)^{-1}, \quad (1)$$

where a , m_b , s – Hoek-Brown criteria; $\sigma_{3n} = \sigma_{3\max}/\sigma_B$ – coefficient; $\sigma_{3\max}$ – normal stress, which corresponds to the upper limit of agreement between the Coulomb-Mohr and Hoek-Brown theories; σ_B - ultimate strength under uniaxial loading for the corresponding material.

Let us write down the definitions for the Hoek-Brown criteria. The criterion a is determined based on the following dependence:

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right), \quad (2)$$

Criterion s :

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right)}, \quad (3)$$

Criterion m_b :

$$m_b = m_i e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)}, \quad (4)$$

where m_i – Hoek-Brown constant (determined either based on laboratory tests or taken from a table [11]); GSI – geological index of rock strength (taken from the table [11]); D – a factor that depends on the degree of disruption of the crystal lattice during the extraction of rock from a rock massif and the relaxation of stresses. It is taken equal to 0 when considering rock in a mountain massif and 1 when considering rock extracted from a mountain massif.

Cohesion is a component of the strength under shear stresses. The cohesive strength is determined based on the following relationship:

$$c = \frac{\sigma_e \left[(1+2a)s + (1-a)m_b \sigma_{3n} \right] (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1}}{(1-a)(2+a) \sqrt{1 + \left(6am_b (s + m_b \sigma_{3n})^{a-1} \right) / ((1+a)(2+a))}}, \quad (5)$$

Then the tangential stress according to the Coulomb-Mohr theory will be equal to [12], [13]:

$$\tau = c + \sigma \sin \varphi \quad (6)$$

The difficulty in determining cohesion and the angle of internal friction lies in determining the coefficient σ_{3n} . For this purpose, it is necessary to consider the main stresses acting on the material and their relationship under different theories. So, according to the Coulomb-Mohr theory, the normal principal stress on an arbitrary area of the material is determined as follows:

$$\sigma_1^{km} = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3^{km}, \quad (7)$$

where σ_3^{km} – normal stress acting on the area perpendicular to the stress σ_1^{km} .

According to the Hoek-Brown theory, similarly to (7), the principal stress on an arbitrary area is determined by:

$$\sigma_1^{hb} = \sigma_3^{hb} + \sigma_e \left(m_b \frac{\sigma_3^{hb}}{\sigma_e} + s \right)^a. \quad (8)$$

Next, to determine the stress σ_{3max} , it is necessary to construct graphs for the principal stresses according to the corresponding equations (7) and (8), on the basis of which to determine the upper limit of their similarity.

Analyzing equations (7) and (8) it was found that for strong materials, such as granite, gabbro, gneiss, marble, the coefficient σ_{3n} tends to zero. Based on this and the angle of internal friction φ taken from tabular values [8], [14], the cohesive strength for the corresponding materials was determined. For verification, known tabular values of cohesion for individual materials were used. The difference from the calculated values was less 5%.

To determine the dilatancy angle, the following relationship can be used:

$$\psi_n = \frac{\varphi}{1 + \log_{10} \sigma_B} \log_{10} \frac{\sigma_B}{\sigma_3 + 0.1}, \quad (9)$$

Residual cohesion and friction angle are parameters that help describe the process of crack propagation in rock during deformation. This approach is used in the model CSFC (cohesive softening – constant friction), CSFH (cohesive softening – friction strengthening), CWFS (cohesive weakening – increased friction) [8],[15]. These models are designed for detailed investigation of crack growth and are based on the Coulomb-Mohr and Hoek-Brown criteria..

In [15] it is noted that the cohesion drop can be determined based on the following dependence:

$$c = c_i \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_{c,r}^p} \right)^2 \right], \quad (10)$$

where ε^p – plastic deformation; c_i – initial cohesion; $\varepsilon_{c,r}^p$ – effective plastic deformation at which cohesion reaches its residual value.

In this case, the residual friction angle is proposed to be determined based on the following dependence:

$$\sin \varphi = \begin{cases} 2 \frac{\sqrt{\varepsilon^p \varepsilon_{\varphi,r}^p}}{\varepsilon^p + \varepsilon_{\varphi,r}^p} \sin \varphi_r, & \varepsilon^p < \varepsilon_{\varphi,r}^p \\ \sin \varphi_r, & \varepsilon^p > \varepsilon_{\varphi,r}^p \end{cases}, \quad (11)$$

where $\varepsilon_{\varphi,r}^p$ – effective plastic deformation at which the friction angle reaches its residual value; φ_r – initial friction angle.

The use of dependencies (10) and (11) has difficulties in determining the effective plastic deformation. For the model CWFS it is assumed that cohesion reaches its residual value at $\varepsilon_{c,r}^p = 0,2\%$, while the residual friction angle reaches its maximum value at $\varepsilon_{\varphi,r}^p = 0,5\%$.

For the model CSFC in [15], another dependence was proposed for determining residual cohesion:

$$c = c_i \left(1 - \frac{\tanh(100\gamma_p)}{\tanh(10)} + 0.001 \right)^n, \quad (12)$$

where γ_p – shear plastic deformation; h – parameter; n – a parameter that determines the type of material (related to the texture of the material and the size of the grains that make up the material). Determined experimentally [15].

The parameter h can be determined based on the following relationship:

$$h = - \sqrt[1/3]{1 + \sin(\varphi) \sin(\psi)} \frac{d\sigma_1^{km}}{d\eta}, \quad (13)$$

where ψ – dilatancy angle; η – parameter that is a function of the input material parameters, after passing peak loads. In this case η is a function of a set of parameters that determine the residual cohesion of the material.

The plasticity coefficient in dependence (12) is equal to $\gamma_p = 0$ when cohesion reaches its maximum value, i.e. at peak strength. With residual cohesion $\gamma_p = 10\%$.

In [11], [12] for the model CWFS it is proposed to determine the residual cohesion and the friction angle based on the dependencies:

$$c = c_r + (c_i - c_r) \left[2 - \frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_r^p}\right)} \right], \quad \varphi = \varphi_i + (\varphi_r - \varphi_i) \left[\frac{2}{1 + \exp\left(-5 \frac{\varepsilon^p}{\varepsilon_r^p}\right)} - 1 \right], \quad (15)$$

where c_r – residual cohesion (in [11], [12] the values are taken $c_r = 0,3c_i$ for limestone); φ_r – friction angle at residual cohesion.

In the models considered above, the dependences (10) - (15), the meaning of plastic deformation is not clear. So for materials that behave plastically, the determination of plastic deformation will not have significant difficulties. However, for elastic-plastic or elastic-visco-plastic models, the

determination of the proportion of plastic deformation will be difficult. Therefore, such models require experimental refinement.

If we consider crushing machines and the processes that occur in them more broadly, then for dynamic fracture, this model for describing the process of crack propagation, namely the loss of material strength, will not be accurate.

Let us plot graphs of the dependence of plastic shear deformations on cohesive strength (Fig. 7) for the materials presented in Table 1.

The value of plastic deformation was taken within 1 mm. Based on which the residual cohesion for the corresponding materials was determined. All data on residual cohesion are listed in Table 1. For each material, three cases were considered, namely when the effective deformation is $\epsilon_{cp} = 0.2\%$, 0.5% , 1% . In general, as noted in [14] and [15], the value of residual cohesion at different percentages of plastic deformation is the same and starts from 0.2% .

To determine the residual friction angle according to formula (16), it is necessary to determine the friction angle at residual cohesion φ_r .

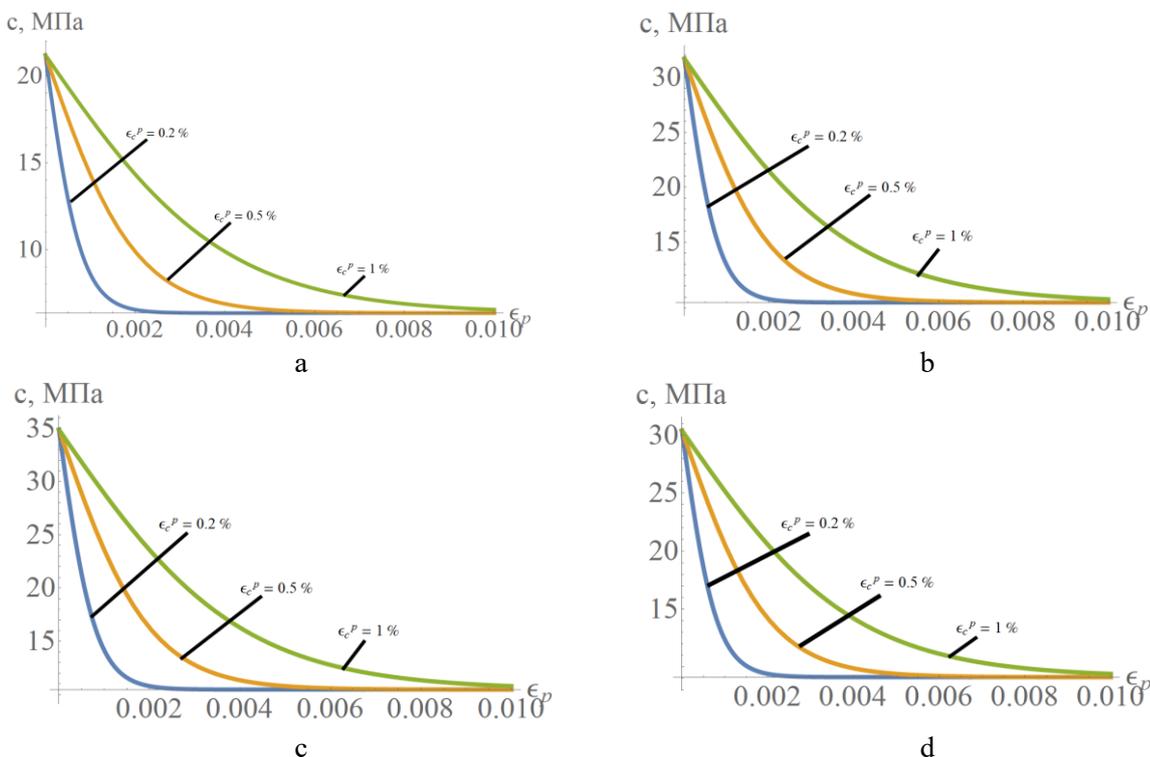


Fig. 7. Residual cohesion depending on plastic shear deformation:
a – marble; b – granite; c – gabbro; d- gneiss

Based on the calculated parameters of the material models, we create a corresponding library in Ansys and perform the corresponding calculations. To reproduce the crushing chamber of the jaw crusher, two models were prepared, which include two plates that compress the material in the form of a sphere. The size of the sphere – $D = 100$ mm, Fig. 8.

As we can see, the stress pattern for the tested rocks is similar, Fig. 8. The graph of normal stresses in the direction of the X and Z axes for the granite material is presented in Fig. 9, a.

The results of the stress pattern are consistent with those presented in [11], [18]. The highest stresses at the beginning of compression occur at the points of contact of the material and the crushing plate. In the center of the rock, the stresses are much lower. With a further increase in the load, the point of contact of the material and the plate increases, due to possible chipping, elastic deformation, compaction of the contact zone, etc.

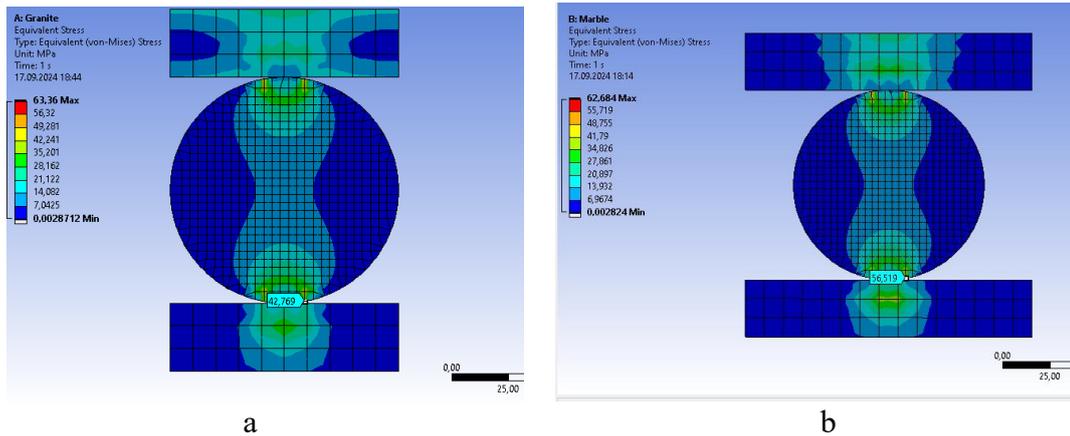


Fig. 8. Stress pattern of rocks under compressive loading: a – granite; b – marble.

As a result, the stress concentration on the contact surface decreases, which can lead to the onset of fractures in the central part of the sample. In [18], significant differences in the stress patterns of homogeneous and heterogeneous materials in terms of structure are noted. If we take into account the fact that most building rocks are heterogeneous materials, i.e. heterogeneous, it follows that it is better to use a discrete approach for modeling such materials, because the heterogeneity of the rock can have a local effect on the stress fields.

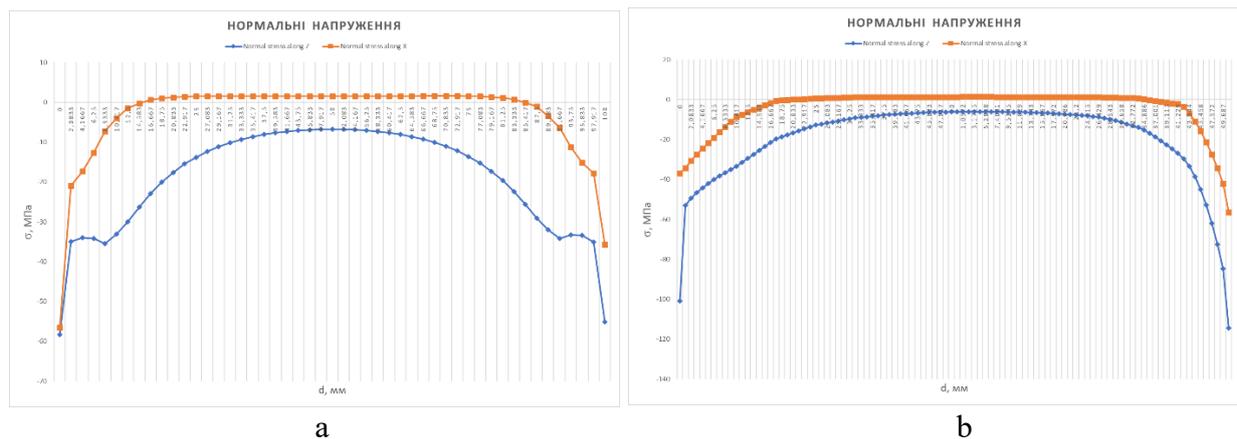


Fig. 9. Normal stresses along the X and Z axes when loaded: a - by flat working bodies; b - by wedge working bodies

In [17], [19] it is noted that if flat steel plates are used to load the sample, then the contact width and contact stresses can be determined based on the following equation:

$$\frac{b}{D} = 2 \left(\frac{2F}{\pi Dt} \right)^{1/2} \left[\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} \right]^{1/2}, \quad (16)$$

where b – contact patch width; D – material diameter; F – load; t – material thickness; ν_p and ν_s – Poisson's ratio of the plate and the material, respectively; E_p and E_s – modulus of elasticity of the plate and material. Fig. 10 shows the picture of stresses in the material due to the application of load to it by wedge-shaped working bodies.

Comparing the stress patterns when loads are applied by flat working bodies and wedge-shaped ones, it becomes clear that the stresses in the material are an order of magnitude higher when using wedge-shaped working bodies. And here it can be noted that the smaller the width of the wedge pad at the contact point, the higher the stress concentration will be. To select the required pad, you can use equation (16).

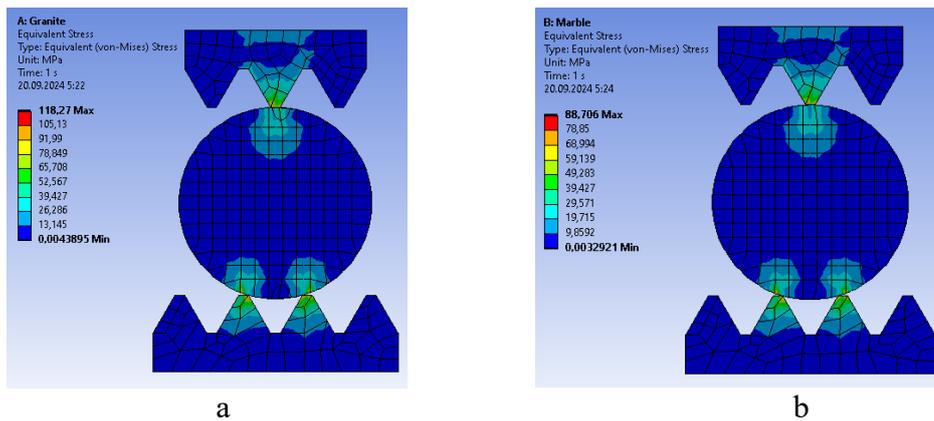


Fig. 10. Stress pattern under conditions of applying load by wedge-shaped working bodies: a – granite; b – marble

The normal stress plot along the Z and X axes is shown in Fig. 9b, which shows significantly higher stresses in the contact zones and has a flatter section closer to the center of the material. This also indicates the mechanism of crack formation and the onset of material failure in the contact zone.

6. Discussion. Based on the considered rheological models in the Ansys software complex, it was established that to study the fracture of materials that have elastic-plastic or plastic properties, it is necessary to use such rheological models as Bilinear Isotropic Hardening or Multilinear Isotropic Hardening. When adopting appropriate boundary conditions for these models, we will obtain Saint-Venant or Prandtl rheological models. When considering energy costs in the process of material fracture, it is important to understand the amount of energy required for the formation and propagation of a crack. During the fracture process, some of the energy is spent on accompanying processes or dissipated in the form of heat. In elastic-plastic, plastic and viscoplastic materials, some of the energy is dissipated on deformation that does not lead to the fracture of the sample. That is, this may be chipping of protruding edges of the material, redistribution of grains of the internal structure, nucleation of a crack system. On the load diagram, such processes are displayed by an unloading curve that does not coincide with the initial load curve. From the studies considered above, it can be noted that the rheological models Bilinear Isotropic Hardening or Multilinear Isotropic Hardening do not reflect the processes of energy dissipation, which is a direction of further research. When considering the rheological model of Pergin with the corresponding boundary conditions in the graph of Fig. 6, the mismatch of the loading and unloading curves is noticeable. The study of the use of the Coulomb-Mohr model indicates a significant number of experimental parameters that must be taken into account. Important parameters of the material destruction process are the internal friction angle and the cohesive strength of the material. For a complete description of the destruction pattern, which will correspond to most crushing machines and the establishment of relevant patterns, it is necessary to further consider the features of the dynamic loading of materials. Additionally, under the condition of considering static loading, it is necessary to consider another common rheological model Drucker-Prager, which is generally better suited for analysis by the finite element method.

7. Conclusions The paper defines the corresponding patterns of fracture of materials with different physical and mechanical properties and under different geometry of crushing plates. The patterns of stresses and deformations of materials with different physical and mechanical properties are considered, under the conditions of using different rheological models. Under conditions of static loading in elastic-plastic, plastic and viscoplastic rheological models of rocks, part of the energy is spent on deformation, which does not lead to the destruction of the rock. The parameters of the Coulomb-Mohr rheological model are determined, graphs of the dependence of cohesion on plastic shear deformation are constructed taking into account the effective plastic deformation. It is established that wedge-shaped working elements of crushing machines create greater stresses compared to flat ones. An analysis of the dependence that determines the rational width of the contact

surface of the working elements of crushing machines depending on the load and physical and mechanical properties of the contacting bodies is performed.

References:

1. Ye. O. Mishchuk, I.I. Nazarenko (2023) Analysis of the energy laws of material destruction. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2023. № 110, p. 294-315. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.294-315>.
2. Evertsson, C. M., & Bearman, R. A. (1997) Investigation of interparticle breakage as applied to cone crushing. *Minerals Engineering*, 10(2), 199–214. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(96\)00146-X](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(96)00146-X).
3. Nikolov, S. (2002) Modelling and simulation of particle breakage in impact crushers. *Minerals Engineering*, 15(10), 715–720. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00074-6).
4. Irani, N., Tafili, M., Salimi, M., Goudarzy, M., & Wichtmann, T. (2025) Particle breakage: Exploring the numerical and experimental approaches in crushable soil mechanics. *Archive of Applied Mechanics*, 95, Article 151. <https://doi.org/10.1007/s00419-025-02845-0>.
5. Tang, C. A., Xu, X. H., Kou, S. Q., Lindqvist, P.-A., & Liu, H. Y. (2001). Numerical investigation of particle breakage as applied to mechanical crushing—Part I: Single-particle breakage. *Powder Technology*, 122(2–3), 109–120. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(01\)00075-2](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00075-2).
6. Cleary, P. W., & Sinnott, M. D. (2015). Simulation of particle flows and breakage in crushers using DEM: Part 1 – Compression crushers. *Minerals Engineering*, 74, 178–197. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.10.021>.
7. Briggs, C. A., & Bearman, R. A. (1996). An investigation of rock breakage and damage in comminution equipment. *Minerals Engineering*, 9(5), 489–497. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(96\)00037-4](https://doi.org/10.1016/0892-6875(96)00037-4).
8. ANSYS. (2025). ANSYS Mechanical APDL material reference (v25.1) [Manual]. ANSYS, Inc. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v251/en/ans_mat/ans_mat.html.
9. Sinha, R.S., Mukhopadhyay, A.K. Failure analysis of jaw crusher and its components using ANOVA. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 38, 665–678 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40430-015-0393-6>.
10. C. Okechukwu1, O. A. Dahunsi, P. K. Oke, I. O. Oladele, M. Dauda and B. M. Olaleye Design and operations challenges of a single toggle jaw crusher: a review. *Nigerian Journal of Technology (NI-JOTECH)* Vol. 36, No. 3, July 2017, pp. 814 – 821. <http://dx.doi.org/10.4314/njt.v36i3.22>.
11. Robert C. Dunne (2019) *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, USA, p. 2258. ISBN 978-0-87335-385-4.
12. Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral processing: Design and operations* (2nd ed.). Elsevier.
13. Haldar, S. K. (2018). *Mineral exploration: Principles and applications* (2nd ed.). Elsevier.
14. Taggart, A. F. (1998). *Hand book of ore dressing* (pp. 255–280). John Wiley & Sons, Inc.
15. Bearman, R.T. *Jaw and Impact Crushers*. In *SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook*; Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.: Englewood, CO, USA, 2019; p. 367.
16. Murithi, M., Keraita, J.N., Obiko, J.O. et al. Optimisation of the swinging jaw design for a single toggle jaw crusher using finite element analysis. *Int J Interact Des Manuf* 18, 6351–6358 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12008-022-01044-3>.
17. Wang Yalei, Lv Kun, Chen Zongyuan The Optimization of Jaw Crusher with Complex Motion Aimed at Reducing Stroke Feature Value of Its Outlet. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)* ISSN: 2321-0869 (O) 2454-4698 (P) Volume-8, Issue-01, January 2018.
18. Donovan, J. G. (2003). *Fracture toughness based models for the prediction of power consumption, product size, and capacity of jaw crushers* (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University). Virginia Tech Electronic Theses and Dissertations.
19. Ciężkowski, P., Maciejewski, J., Bąk, S., & Kwaśniewski, A. (2020). Application of the new shape crushing plate in machine crushing processes. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 42(1), 83–96. <https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0029>.

УДК 622.621

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0605>**¹Наталія Сорокова,**

доктор технічних наук, професор

<https://orcid.org/0000-0002-3529-7145>, e-mail: aes_kpi@ukr.net**²Юлія Кольчик,**

кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4559-5725>, e-mail: kolchik.iu@knuba.edu.ua**²Лариса Пашкова,**

старший викладач,

<https://orcid.org/0009-0001-2056-6090>, e-mail: pashkova.lv@knuba.edu.ua**²Володимир Новіков,**

кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0009-0009-6592-0805>, e-mail: novikov.vd@knuba.edu.ua**²Наталія Чепурна,**

кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0001-8044-7563>, e-mail: chepurna.nv@knuba.edu.ua

¹Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Берестейський просп., 37, Київ, 03056, Україна

²Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ОБЛАДНАННЯ ВИДОБУТКУ, ПІДГОТОВКИ, ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ І ГАЗУ

АНОТАЦІЯ. Процеси розробки нафтогазових покладів є вельми різноманітними і залежать від великої кількості факторів, що обумовлює їх підвищену небезпеку. Виникнення аварійних ситуацій на будь-якому етапі видобування може призвести до значних втрат матеріальних, людських ресурсів та нанести значну шкоду екології. В роботі розглянуті питання забезпечення технологічних процесів видобування нафти та газу, їх підготовки, транспортування та зберігання необхідним обладнанням. Показані стадії розробки нафтового покладу, розглянуті особливості процесу видобування копалин та відмінності в виборі обладнання в залежності від величини запасів нафти й газу, глибини їх залягання, продуктивності, ступеня вироблення та обводнення, промислової підготовки та транспортування продукції. Наведена необхідність більш ретельної розробки родовищ, особливо на останніх стадіях процесів видобування. Розглянуті заходи по інтенсифікації нафтовіддачі, підвищенню використання енергії пласта, безпеки та екологічності видобутку.

Ключові слова: видобування нафти та газу, спосіб видобутку, пластова енергія, обладнання.

EQUIPMENT FOR PRODUCING, PREPARATION, TRANSPORTATION AND STORAGE OF OIL AND GAS

ABSTRACT. The processes of oil and gas development are very diverse and depend on a large number of factors, which makes them highly dangerous. The occurrence of emergencies at any stage of production can lead to significant losses of material and human resources and cause significant damage to the environment. The paper considers issues of ensuring technological processes of oil and gas extraction, their preparation, transportation and storage with the necessary equipment. The stages of oil field development are shown, the features of the mineral extraction process are considered, and the differences in the choice of equipment are considered depending on the size of oil and gas reserves, their depth, productivity, degree of production and waterlogging, industrial preparation and transportation of products. The need for more thorough development of deposits, especially at the final stages of the extraction process,

is highlighted. The need for more thorough development of deposits, especially at the final stages of the extraction process, is highlighted. Measures to intensify oil recovery, increase the use of reservoir energy, and ensure the safety and environmental friendliness of extraction are considered.

Keywords: *oil and gas extraction, extraction method, reservoir energy, equipment.*

Постановка проблеми. Питання забезпечення технологічних процесів видобування нафти та газу сучасним енергоємним обладнанням є актуальним, оскільки від цього, зокрема, залежать вартість копалин та енергії і нафтопродуктів, які отримують при їх використанні.

Актуальність дослідження. Нафта й газ є основними енергоносіями, які мають важливе значення в економіці країни. Продукти переробки нафти та газу є основою всіх видів палива для енергетики, транспорту та сировиною для хімічної промисловості. З нафти отримують бензин, керосин, дизельне паливо, змащувальні масла, мазут, парафін, бітум та інші нафтопродукти. При хімічній переробці нафти й газу отримують синтетичні волокна, каучуки, пластмаси, фарби.

Видобуток нафти і газу в Україні здійснюється у східному, західному та південному регіонах, з найбільшими запасами та обсягами видобутку у східному регіоні, особливо в Полтавській, Сумській та Харківській областях. Усі родовища розрізняються за величиною запасів нафти й газу, геологічною будовою, продуктивністю, ступенем вироблення й обводнення, особливостями технології видобутку нафти й газу, промисловою підготовкою та транспортуванням продукції [1].

Фізико-хімічні властивості нафти та газу визначаються складом тобто масовим вмістом у ній хімічних елементів: вуглецю і водню. Вміст вуглецю становить 83–87 %, водню 12–14%. Вміст інших елементів – сірки, кисню, азоту рідко перевищує 3–4 %.

Нафту поділяють на фракції шляхом перегонки. Фракція нафти бензин має діапазон кипіння 30–200 С°, керосин 200–300 С°. Фракція, що залишається, це мазут, з якого отримують бітуми, гудрони, масла. Залежно від фракційного складу розрізняють бензинові (легкі) та паливні (важкі) нафти.

Пластові води присутні в більшості нафтогазових родовищ і є звичайним супутником нафти. Крім пластів, у яких вода залягає разом з нафтою, зустрічаються й чисто водонесні пласти. Пластова вода в нафтових і газових покладах може перебувати не тільки в чисто водній зоні, але й у нафтовій і газовій, насичуючи разом з нафтою та газом продуктивні породи покладів.

Формулювання цілей статті. Задачею дослідження є аналіз обладнання, що використовується при розробці нафтогазових покладів для забезпечення повної розробки родовищ упродовж всього терміну їх життєдіяльності, заданого видобутку нафти та газу за умови мінімальних витрат і, за можливістю, з найбільшими значеннями коефіцієнтів нафтовіддачі.

Останні дослідження та публікації. Темі підвищення ефективності видобування корисних копалин, особливо на кінцевих стадіях розробки присвячена значна кількість робіт. Методика визначення кінцевих строків експлуатації нафтових та газових свердловин, аналіз економічної доцільності та технічної можливості їх подальшої роботи при різних методах інтенсифікації розробки дозволяє оптимізувати видобуток копалин [2]. В [3] наведені економічні аспекти інтенсифікації видобутку складних запасів нафти і газу в Україні, можливості зростання ефективності при освоєні залишкових запасів вуглеводнів та вирішення проблем виснаження традиційних родовищ, описані проблеми видобутку газу в Україні та шляхи їх подолання. В [4, 5] розглянуті питання актуальності та доцільності розробки виснажених родовищ та наведені пропозиції щодо удосконалення процесів видобутку вуглеводнів із таких родовищ, зокрема, шляхом впровадження нових технологій та методів підвищення нафтовіддачі пластів.

В [3] розглянуті положення науково-обґрунтованого вибору технологій та свердловин для впровадження методів інтенсифікації видобутку нафти шляхом дії на привибійну зону свердловин, та вибором технології та обладнання в залежності від стадії розробки родовища.

Основна частина У розробці нафтового покладу виділяють чотири стадії: I – наростаючий видобуток нафти; II – стабілізація видобутку нафти; III – падаючий видобуток нафти; IV – пізня стадія експлуатації покладу. На першій стадії наростання обсягів видобутку нафти забезпечується в основному введенням у розробку нових експлуатаційних свердловин в умовах високих пластових тисків. Спосіб видобутку нафти в цей період фонтанний, обводненість відсутня. Тривалість першої стадії становить близько 4–6 років (залежно від запасів нафти та кількості свердловин). Друга стадія – стабілізація нафтовидобутку – починається після розбурювання основного ресурсу свердловин. У цей період видобуток нафти спочатку дещо наростає, а потім починає повільно знижуватися. Збільшення видобутку нафти на цій стадії можна досягти більш щільним розміщенням сітки свердловин, збільшенням нагнітання води або газу в пласт для підтримання пластового тиску, проведенням робіт по підвищенню проникності пласта та ін.[7] Обводненість копалин може досягати 50 %. Тривалість другої стадії становить близько 5–7 років. Третя стадія – падаючий видобуток нафти – характеризується зниженням нафтовидобутку, збільшенням обводнення продукції свердловин і великим падінням пластового тиску. Цей етап закінчується у випадку досягнення 80–90 % обводнення. Після закінчення фонтанного способу видобутку усі свердловини працюють на механізованих способах видобутку. Четверта стадія – пізня стадія експлуатації покладу визначається порівняно низькими обсягами відбору нафти та великими відборами води. Обводненість досягає 90–95 % і більше. Цей період є найбільш тривалим і становить 15–20 років. Загальна тривалість розробки будь-якого нафтового родовища становить 40–50 років. На рис. 1 зображені стадії розробки нафтових родовищ.

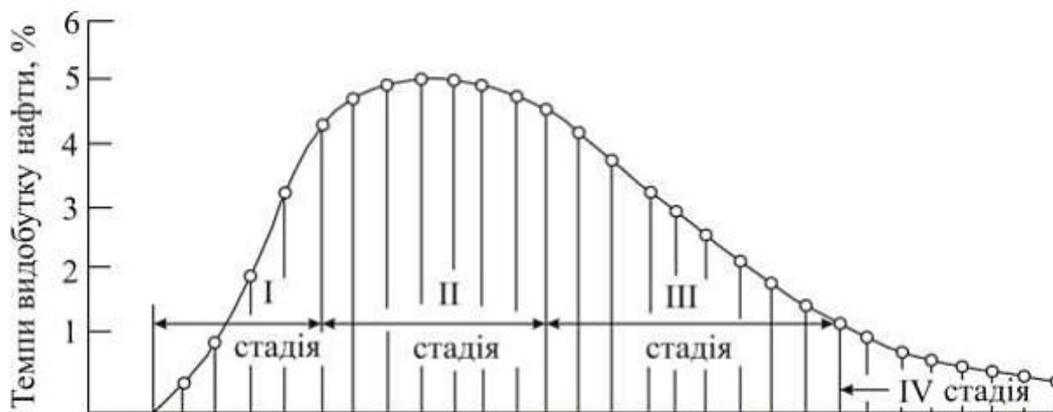


Рис. 1. Стадії розробки нафтових родовищ
 Fig. 1. Stages of oil field development

Для підвищення нафтовіддачі використовують гідродинамічні, фізико-хімічні та теплові методи.

Обладнання, що використовується при розробці нафтогазових родовищ, залежить від пластових умов, типу родовища, способу видобутку нафти та газу (фонтанний, механізований) та включає бурове обладнання, насоси, компресори, трубопроводи та наземні установки, такі як фонтанна арматура, маніфольди та системи автоматики, а також спеціалізовані платформи для морського видобутку, призначені для вилучення, підготовки та транспортування вуглеводнів із надр Землі до місць зберігання та переробки [8].

Для видобутку нафти та газу здійснюють буріння свердловин - циліндричних отворів в земній корі, що мають малий поперечний переріз та дуже значну довжину й призначені для переміщення корисних копалин на поверхню. Початок свердловини (на поверхні) називають гирлом, її кінець – вибій. Весь порожній простір від гирла до вибою називається стовбуром. Свердловини можуть бути вертикальними або похило-спрямованими. В окремих випадках бурять горизонтальні свердловини. Окрім видобутку свердловини використовують для закачування в надра води, повітря або газу для підтримання пластового тиску. Широке

застосування отримали механічні способи буріння: ударний, ударно-обертальний, обертальний, турбінний [9].

Бурова установка складається з вишки для підвішування талевої системи та розміщення бурових труб, обладнання для спуско-підйомних операцій, включаючи системи автоматизації та механізації, обладнання для подачі й обертання інструмента, насосів для прокачування промивної рідини, силового приводу, систем для приготування й очищення промивної рідини; контрольно-вимірвальні прилади й автоматика.

Якщо підйом нафти на поверхню відбувається тільки за рахунок пластової енергії, спосіб експлуатації називається фонтанним. При цьому на гирло свердловини встановлюються запірні вентиля або клапани. Такий спосіб є найбільш економічним і, його застосовують на виявлених, енергетично не виснажених родовищах [10].

Якщо свердловини не можуть фонтанувати, то для підйому нафти на поверхню використовують один з механізованих способів видобутку нафти: газліфтний або насосний з витратою додаткової, штучно введеної у свердловину енергії. При газліфтному способі видобутку нафти у свердловину подають за допомогою компресорів стиснений газ.. Найбільш поширеним механізованим способом є насосний. У насосних свердловинах рідина піднімається на поверхню за допомогою свердловинних штангових насосів, що спускаються у свердловину і заглибних електронасосів.

Устаткування свердловини підрозділяється на підземне й наземне. До підземного обладнання належать насосно-компресорні труби. Для підйому рідини із свердловини використовуються гладкі насосно-компресорні труби, які в колоні з'єднуються за допомогою муфт. До наземного обладнання при фонтанному способі видобутку належать фонтанна арматура, викидна лінія для підключення свердловини до системи промислового збору, маніфольд - розгалужена система трубопроводів з клапанами та приладами, призначена для

керування потоками рідин чи газів. Фонтанна арматура призначена для герметизації кільцевого простору між експлуатаційною колоною та насосно-компресорними трубами, для підвіски колон підйомних труб, для створення протитиску на гирлі, для проведення технологічних операцій, для контролю і регулювання режиму експлуатації свердловини.

При глибинонасосному способі видобутку і використанні штангової насосної установки (рис. 2) у свердловині встановлюють поршневий насос, який приводиться в дію поверхневим приводом за допомогою колони штанг. В цій установці наземне обладнання включає в себе верстат-качалку, редуктор, електродвигун, блок управління свердловиною, а підземне окрім насосно-компресорних труб включає в себе насосні штанги, штанговий глибинний насос і різні захисні пристрої, що поліпшують роботу установки в ускладнених умовах

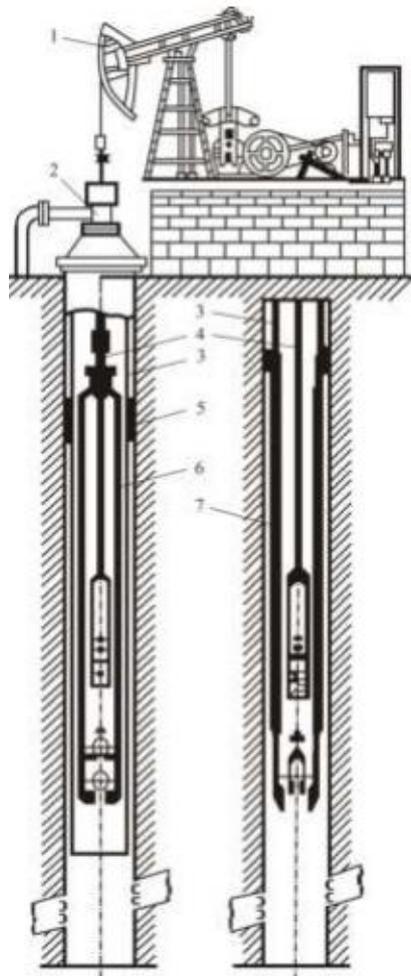


Рис. 2. Свердловинний штанговий насос: 1 – станок-качалка; 2 – обладнання устя; 3 – колонна насосно-компресорної труби; 4 – підвішені на планшайби колони насосних штанг; 5 – замкова опора; 6 – штанговий насос вставного типу; 7 – штанговий насос невставного типу.

Fig. 2. Downhole rod pump: 1 – rocker; 2 – wellhead equipment; 3 – tubing string; 4 – pump rod columns suspended on faceplates; 5 – lock support; 6 – plug-in type rod pump; 7 – non-plug-in type rod pump

Цей спосіб має ряд недоліків, зокрема недостатньо висока подача штангових насосів, необхідність установлення громіздкого обладнання, небезпека обриву штанг у разі великих глибин підвіски та видобутку в'язких нафт обмежують їх застосування. Для експлуатації обводнених, високопродуктивних, глибоких і похилих свердловин широко застосовуються заглибні відцентрові електронасоси (рис.3). Відмінна риса таких насосних установок – розташування двигуна безпосередньо в насосі та усунення штанг.

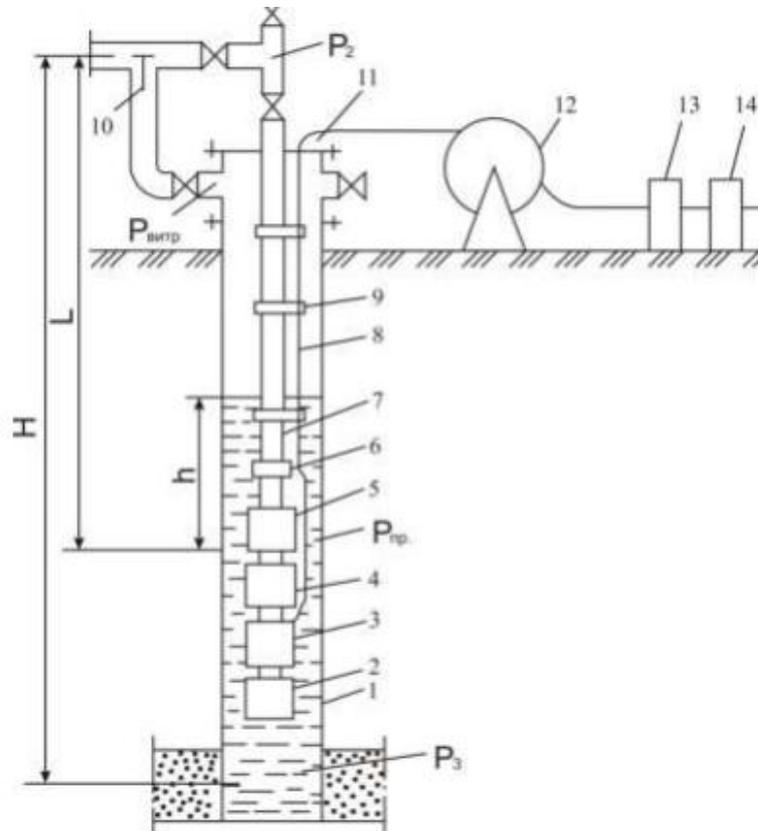


Рис. 3. Схема установки занурювального відцентрового електронасоса:

1 – експлуатаційна колона; 2 – компенсатор; 3 – електродвигун; 4 – протектор; 5 – відцентровий електронасос; 6 – зворотний і спускний клапани; 7 – насосно-компресорні труби; 8 – електричний кабель; 9 – кріпильний пояс; 10 – зворотний перепускний клапан

Fig. 3. Installation diagram of a submersible centrifugal electric pump: 1 – service column; 2 – compensator; 3 – electric motor; 4 – protector; 5 – centrifugal electric pump; 6 – check and drain valves; 7 – pump and compressor pipes; 8 – electric cable; 9 – fastening belt; 10 – check bypass valve.

Для вибору насоса в такій установці керуються паспортною характеристикою насоса значеннями напору H , подачі насоса Q споживаної потужності N і ККД. На практиці не завжди вдається підібрати насос з характеристикою, що точно відповідає характеристиці свердловини. Доводиться вдаватися до штучного регулювання роботи насоса, наприклад, до обмеження його подачі. У промислових умовах подачу насоса можна обмежити за допомогою штуцера, але при цьому різко знижується ККД насоса, гирло свердловини необхідно обладнати арматурою підвищеного тиску, збільшується осьове навантаження на вал і робочі колеса, що скорочує термін служби насосної установки. Альтернативою, що усуває вищевикладені недоліки є регулювання характеристик установки шляхом зміни числа робочих ступенів насоса. Чим більше ступенів, тим вищий створюваний тиск за умови тієї ж подачі, але в цьому випадку необхідно витягти установку зі свердловини.

В більшості випадків практична розробка українських родовищ обмежується першою та другою стадіями. Переходити до третьої та четвертої вважається нерентабельним. Результатом такого підходу є розвиток незворотних процесів, які призводять до значних втрат

вуглеводнів. Мало уваги приділяється виснаженим родовищам. Проведені дослідження, які вказують на те, що родовища у своїй більшості не припиняють процесу свого формування [11]. Тобто, родовища, запаси яких вичерпуються, через деякий час знову поповнюються. Тому, слід подовжити термін розробки родовища і, за необхідності проводити консервацію видобувних свердловин, а не ліквідувати їх.

Для підготовки та транспортування: нафти та газу використовують **компресорні та насосні станції** для стиснення та перекачування, **холодильники та сепаратори** для первинної підготовки (видалення газів, води). **системи автоматики та контрольно-вимірювальна апаратура при** подачі в магістральні трубопроводи. Трубопровідний транспорт має великі перспективи розвитку, пов'язані з постійним зростанням потреб у нафті й особливо в природному газі і є найефективнішим способом. Крім того використовується залізничний та автомобільний транспорт з використанням цистерн, нафтоналивні судна - танкери, у трюмах яких розміщувалися спеціальні ємності для нафти. До систем переміщення нафти і нафтопродуктів висуваються вимоги безперебійності доставки від родовищ до нафтопереробних заводів та до споживачів; мінімальні фінансові витрати та терміни технологічного процесу; збереження якості продукту; зниження до мінімуму втрат [12]. Кожен вид транспортування має свої недоліки і переваги. У разі перевезення нафти і нафтопродуктів на значні відстані застосовують комбінації з різних видів транспорту.

Висновки. Для ефективної та повної розробки нафтових та газових покладів, зменшення енергоємності треба обґрунтовано підходити до вибору технології та відповідного обладнання. Крім того необхідно здійснювати регулярне обслуговування, профілактичні заходи, модернізацію вузлів обладнання, що використовується.

Таким чином актуальним є аналіз та застосування новітніх досягнень в цій галузі та розробка захисту існуючого обладнання від ворожих атак.

Список використаної літератури:

1. Фік М.І., Кріпко О.І., Раєвський Я.О., Варавіна О.П., (2019). Розробка та експлуатація нафтових та нафтогазових родовищ *НТУ "ХП"*.
2. Ганущак О.М., Бабій Т. (2007) Визначення граничних меж можливості та доцільності подальшої експлуатації свердловин. *Нафтова і газова промисловість*, (2), 24-26.
3. Пілка М.С. (2017) Економічні передумови застосування методів інтенсифікації при розробці родовищ із важковидобувними запасами в Україні. *Науковий вісник ІФНТУНГ. Серія "Економіка, та управління в нафтогазовій і газовій промисловості"*, 1(15), 36-47. ISSN 2409-0948.
4. Дорошенко В.М., Єгер Д.О., Зарубін Ю.О., Кондрат Р.М. (2007). Напрямки вирішення проблем розробки виснажених родовищ нафти і газу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 4(25), 17-19.
5. Купер І.М. (2015). Деякі напрямки стабілізації видобутку нафти в Україні *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 3(56). 7-10.
6. Іванченко І.М. (2012). Аналіз ефективності методів інтенсифікації видобутку нафти на нафтових родовищах України. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (4), 71-77.
7. Нагорний В.П., Денисюк І.І. (2013). Технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів. *Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України*.
8. Бойко В.С. (2004). Розробка та експлуатація нафтових родовищ. *Реалпринт*.
9. Дячук В.В., Бікман Є.С., Кісельова С.О. (2009). Проектування розробки та облаштування газових (газоконденсатних) родовищ. *За загальною редакцією проф. О.Ф. Редька. "BURUN&K"*
10. Фік І.М., Римчук Д.В. (2014). Облаштування газових та нафтових фонтанних свердловин при експлуатації. *Колонні обв'язки (1), "Ексклюзив"*.
11. Купер І.М. (2002). До проблем розробки виснажених родовищ. *Нафтова і газова промисловість* (5) 28-29.
12. Ширін Л.Н., Деніщенко О.В., Барташевський С.Є., Коровяка Є.А., Расцветаєв В.О. (2019) Транспортування нафти, нафтопродуктів і газу. НТУ "ДП".

References:

1. Fik M. I., Khripko O. I., Raevskii Ya. O., Varavina O. P. Rozrobka ta yeks-pluatatsiya naftovikh ta naftogazovikh rodovishch. Kharkiv. NTU «KhPI» 2019. (in Ukrainian).
2. Ganushchak O.M., Babii T.A. «Viznachennya granichnikh mezh mozhlivosti ta dotsilnosti podalshoi yekspluatatsii sverdlovin.» Naftova i gazova promislovist. №2, 2007. p.p..24-26. (in Ukrainian).
3. Pilka M. S."Ekonomichni peredumovi zastosuvannya metodiv intensifikatsii pri rozrobtsi rodovishch iz vazhkovidobuvnimi zapasami v Ukraïni» Naukovii visnik IFNTUNG. Seriya: Yekonomika ta upravlinnya v naftovii i gazovii promislovosti ISSN 2409–0948. № 1(15), 2017, p.p.36-47. (in Ukrainian).
4. Doroshenko V.M., Eger D.O., Zarubin Yu.O., Kondrat R.M. «Napryamki virishennya problem rozrobki visnazhenikh rodovishch nafti i gazu.» Rozvidka ta rozrobka naftovikh i gazovikh rodovishch. № 4 (25), 2007, p.p. 17 – 19. (in Ukrainian).
5. Kuper I.M. «Deyaki napryamki stabilizatsii vidobutku nafti v Ukraïni», Rozvidka ta rozrobka naftovikh i gazovikh rodovishch. №3(56), 2015, p.p. 7-10. (in Ukrainian).
6. Ivanchenko I.M. «Analiz yefektivnosti metodiv intensifikatsii vidobutku nafti na naftovikh rodovishchakh Ukraïni.» Visnik Vinnitskogo politekhnichnogo institutu. №4, 2012, p.p. 71-77. (in Ukrainian).
7. Nagornii V. P., Denisyuk I. I. Tekhnologii intensifikatsii vidobutku vug-levodniv . Kiïv, Institut geofiziki im. S. I. Subbotina NAN Ukraïni, 2013. (in Ukrainian).
8. Boiko V. S. Rozrobka ta yekspluatatsiya naftovikh rodovishch. Kiïv «Real-print», 2004. (in Ukrainian).
9. D'yachuk V. V. Bikman Є. S., Kiselova S. O. Proektuvannya rozrobki ta oblashtuvannya gazovikh (gazokondensatnikh) rodovishch. Za zag. red. d-ra tekhn. nauk, prof. Redko O. F. Kharkiv. «BURUN i K», 2009. (in Ukrainian).
10. Fik I. M., Rimchuk D. V. Oblashtuvannya gazovikh ta naftovikh fontannikh sverdlovin pri yekspluatatsii. Ch. 1. Kolonni obv'yazki. Kharkiv. «Eksklyuziv», 2014. (in Ukrainian).
11. Kuper I.M. «Do problemi rozrobki visnazhenikh rodovishch» Naftova i gazova promislovist. № 5, 2002, p.p. 28-29. (in Ukrainian).
12. Shirin L.N., Denishchenko O.V., Bartashevskii S.Є., Korovyaka Є.A., Ras-tsvetaev V.O. Transportuvannya nafti, naftoproduktiv i gazu. Dnipro. NTU «DP», 2019. (in Ukrainian).

УДК 622.621

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0606>**¹Лариса Пашкова,**

старший викладач

<https://orcid.org/0009-0001-2056-6090>, e-mail: pashkova.lv@knuba.edu.ua**¹Володимир Новіков,**

кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0009-0009-6592-0805>, e-mail: novikov.vd@knuba.edu.ua**¹Наталія Чепурна,**

кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0001-8044-7563>, e-mail: chepurna.nv@knuba.edu.ua**¹Олександр Погосов,**

кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0003-2158-8897>, e-mail: pohosov.oh@knuba.edu.ua**¹Михайло Кириченко,**

кандидат технічних наук, доцент

<https://orcid.org/0000-0002-3651-3153>, e-mail: kyrychenko.ma@knuba.edu.ua

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ГЕОЛОГІЇ НАФТОГАЗОВИХ ПОКЛАДІВ НА ОСНОВІ СЕЙСМІЧНИХ ДАНИХ

Анотація. Кореляція горизонтів, трасування порушень, виділення сейсмофаціальних зон за сейсмічними образами є одним із найважливіших критеріїв визначення структурної будови нафтогазових покладів. Характеристика сейсмічних відображень геологічних структурних форм дозволяють визначати їх розподіл у просторі та інтегрувати з геологічною природою, а саме пов'язувати сейсмічні малюнки з геологічною будовою структурних елементів, стратиграфічних меж та зон розвитку колекторів, які є ключовими для розуміння геологічної моделі. Інтерпретація сейсмічних даних дозволяє розрізняти і головне прогнозувати поклади будь-якого родовища. Ці дані є основою аналізу вуглеводневого потенціалу. Помилки при кореляції відбиваючих горизонтів і розломів, і також зон зміни динамічних характеристик сейсмічного поля, критичним чином впливають на точність побудови геологічної структури нафтогазового покладу, і на визначення його обсягу та відповідно на можливість отримання притоку вуглеводнів.

Ключові слова: нафтогазовий поклад, інтерпретація, відбиваючий горизонт, тектонічне порушення, сейсмофація.

INTERPRETATION OF THE GEOLOGY OF OIL AND GAS DEPOSITS BASED ON SEISMIC DATA

Abstract. Correlation of horizons, tracing of disturbances, and identification of seismic facies zones based on seismic images are one of the most important criterios for determining the structural composition of oil and gas deposits. The characteristics of seismic reflections of geological structural forms allow determining their distribution in space and integrating them with the geological nature, in particular, linking seismic patterns with the geological structure of functional elements, stratigraphic boundaries, and zones of reservoir development, which are key to understanding the geological model. Interpretation of seismic data allows us to distinguish and, most importantly, predict the deposits of any field. These data form the basis for analysing hydrocarbon potential. Errors in the correlation of reflective horizons and faults, as well as zones of change in the dynamic characteristics of the seismic field, critically affect the accuracy of the formation of the geological structure and volume of the oil and gas deposit and, accordingly, the possibility of obtaining a hydrocarbon inflow.

Keywords: oil and gas deposit, interpretation, reflective horizon, fault, seismofacies.

Актуальність дослідження. Інтерпретація сейсмічних даних має ключове значення для прогнозування, виявлення, опису структурних особливостей вуглеводнів та інтегрує між собою сейсмічні та геологічні дані. Сейсмічні зображення дозволяють перейти від геофізичних цифрових даних безпосередньо до геологічних моделей (структурних карт, поперечних розрізів, тривимірних кубів властивостей), що описують структуру, літологію та потенціал нафтогазових покладів. Традиційна сейсмічна інтерпретація значною мірою залежить від досвіду інтерпретатора та містить елементи суб'єктивності, що може створювати труднощі для точної інтерпретації та призводити до неоднозначного трактування геологічних кордонів. Ця проблематика здебільшого закладена у самій суті сейсмічної інтерпретації. У загальному сенсі висока невизначеність інтерпретації пов'язана з природними факторами, зі складною геологією перспективних об'єктів, із недостатньою кількістю сейсмічних даних та відповідно мінливістю інтенсивності відбиття. Тому використання прийомів і сучасних підходів в інтерпретації необхідні для реконструкції геології нафтогазових покладів, зокрема щодо складнобудованих та локальних літологічних об'єктів, і визначає практичну та наукову значущість даної роботи.

Формування цілій статі. Метою статті є обґрунтування процесу кореляції відображень і картування тектонічних порушень при сейсмічній інтерпретації при прогнозі та виявленні покладів вуглеводнів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Формування понять кореляції горизонтів і порушення дослідити питання уточнення кореляції горизонтів при постійній деталізації становища тектонічних порушень, і навпаки.
2. Аналіз сейсмічного відбиття: враховуючі динамічні параметри сейсмічного поля встановити причини зміни фаз простеження, з якими може бути пов'язана наявність тектонічних порушень, фаціальної мінливості розрізу, форми геологічних тіл.
3. Структурна узгодженість кореляції з сейсмічними даними: відзначити основні закономірності будови нафтогазових покладів з різними варіаціями структурного напластування і з їх практично нескінченими природними комбінаціями.

Огляд літератури. Базові теоретичні та методичні засади інтерпретації сейсмічних даних у нафтогазовій розвідці викладено в монографіях Onajite (2014) [1], Nanda (2016 [2]) та Sukmono and Ambarsari (2019) [3]. Як зазначено Onajite (2014), аналіз сейсмічних даних є основою для побудови структурної моделі, виділення пасток та оцінки перспектив нафтогазоносності. Nanda (2016) детально розглядає роль інтерпретації як ключового етапу переходу від сейсмічних відображень до геологічної моделі родовища, підкреслюючи значення інтеграції сейсміки зі свердловинними та петрофізичними даними. Sukmono and Ambarsari (2019) акцентують увагу на практичних аспектах інтерпретації, зокрема на роботі з горизонтами, розломами та сейсмічними атрибутами в задачах пошуку вуглеводнів. Значний розвиток отримали підходи, пов'язані з атрибутним аналізом і сейсмофаціальною інтерпретацією. Як показано в роботі Розловської (2000) [4], використання сейсмічних атрибутів дозволяє уточнювати геологічну будову розрізу та підвищувати інформативність інтерпретації. Подальший розвиток цих ідей представлено в роботах, де атрибутний аналіз застосовується для прогнозу колекторських властивостей і виділення перспективних зон. У класичній монографії Brown [6] детально розглянуто методологічні основи інтерпретації 3D-сейсмічних даних, зокрема ідентифікацію та кореляцію сейсмічних горизонтів, аналіз відбивних подій і просторову інтерпретацію геологічних структур. Автор приділяє особливу увагу принципу простежування однакової фази відбиття між сейсмічними профілями та обґрунтовує доцільність використання профілів падіння для первинної кореляції горизонтів. Праця є фундаментальним джерелом з теорії та практики сейсмічної інтерпретації і широко використовується як базовий навчальний та довідковий матеріал у нафтогазовій геофізиці. Практичне застосування методів сейсмічної інтерпретації для оцінки нафтогазових ресурсів розглянуто у низці регіональних досліджень. Як показано Fajana et al. (2018) [7] інтеграція сейсмічної інтерпретації з петрофізичним аналізом дозволяє обґрунтовано оцінювати нафтогазоносний потенціал родовищ. За результатами Safa et al. (2025) [8] детальна

структурна інтерпретація є ефективним інструментом прогнозу нафтогазоносності в умовах складної тектонічної будови. Таким чином, аналіз наведених джерел свідчить, що сучасна сейсмічна інтерпретація поєднує різні класичні геофізичні підходи, що дозволяє підвищити достовірність прогнозу формування та виявлення нафтогазових покладів.

Основна частина. Хоча сейсмічні картини є непрямими показниками літологічного складу та колекторських властивостей нафтогазовмісних порід, проте можуть бути ознаками різних типів покладів вуглеводнів.

Виділення регіональних горизонтів. Генезис геологічних кордонів з паралельними та субпаралельними шарами зазвичай відповідають великим резервуарам нафти та газу, простежуються на сейсмічних горизонтах на значні площі, та впевнено надають геологічну прив'язку у досліджуваній зоні (рис. 1).

Такі головні відбиваючі горизонти є регіональними маркерами в товщі гірських порід і добре витримані по простяганню. Простеження та інтерпретація опорних регіональних горизонтів дозволяють суттєво підвищити розуміння всієї сейсмічної картини, що відображає тектонічну історію регіону.

Але є горизонти з низькою роздільною здатністю, де складно проводити інтерпретацію, проте ці відображення мають також дуже важливу цінність для пошуку вуглеводнів. За рахунок своїх властивостей вони мають досить складні візуальні ефекти. Для таких горизонтів використовується особлива методика та принципи [2]. Зазвичай такі горизонти починають трасувати від свердловини або між свердловинами, визначаючи межі стратиграфічного маркеру. Горизонт трасується відрізками, з постійним перемиканням на перетинах розрізів поступово просуваючись углиб розрізу за принципом – від надійнішого до менш надійного. Товщина пластів зазвичай зберігається чи змінюється закономірно геологічної ситуації, при цьому горизонти можуть мати певну закономірність із сусідніми горизонтами, де "впевнений" горизонт служить навігатором під час інтерпретації. І якщо у верхній частині спостерігається складчастий розріз (перегини), то і в нижній частині горизонти мають згодну характеристику, зберігаючи принцип морфологічної подібності.

Упорядковані відбитки з точною геометрією горизонтів на сейсмічних розрізах у межах антиклінальних форм є основними сейсмічними характеристиками, що показують наявність екранованих покладів нафти і газу.

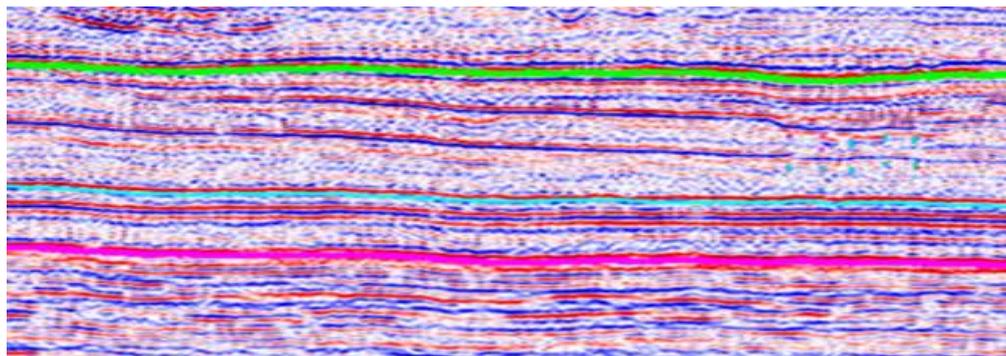


Рис. 1. Фрагмент часового розрізу з інтерпретацією основних горизонтів.

Fig. 1. Fragment of a time section with interpretation of the main horizons

Літологічне заміщення теригенних порід. Кліноформні зображення вказують на можливість формування літологічних покладів, пов'язаних із заміщенням фацій гірських порід. Зони заміщення фацій (рис. 2) можна знайти за змінами динамічних характеристик відображення, де, як правило, високочастотний характер запису спостерігається в глинистій зоні, а низькочастотний – у піщаній. Швидкісні характеристики також мають закономірності, зазвичай швидкості збільшується в піщаному шарі і зменшується в глинах. Такі ознаки характерні для стратиграфічних та комбінованих пасток, де вміст вуглеводнів забезпечується зміною фільтруючих властивостей порід.

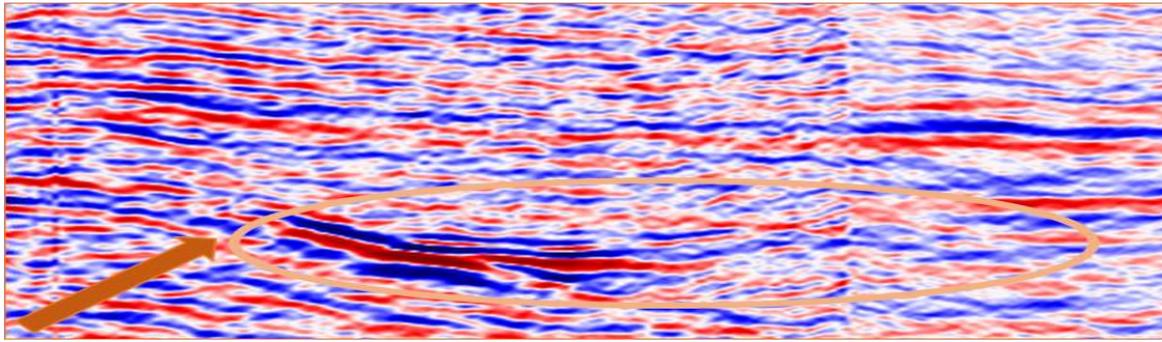


Рис. 2. Заміщення теригенних порід.
Fig. 2. Replacement of terrigenous rocks

Виклинювання. Зони нахилу пластів проявляються у вигляді клиноподібного зменшення потужності горизонтів відбиття зі загасанням їхньої амплітуди. Виклинювання піщаних нафтогазоперспективних порід, найчастіше спостерігаються завжди за закономірним сходженням і злиття осей синфазності (рис. 3), і мають зв'язок як правило зі швидкісною характеристикою цього пласта та його потужністю. При інтерпретації виклинювання горизонти проводяться близько один до одного, в межах однієї фази, і можуть мати одне відображення в сейсмічному полі, так що в такому випадку можна говорити про наближення до нульової потужності пласта.

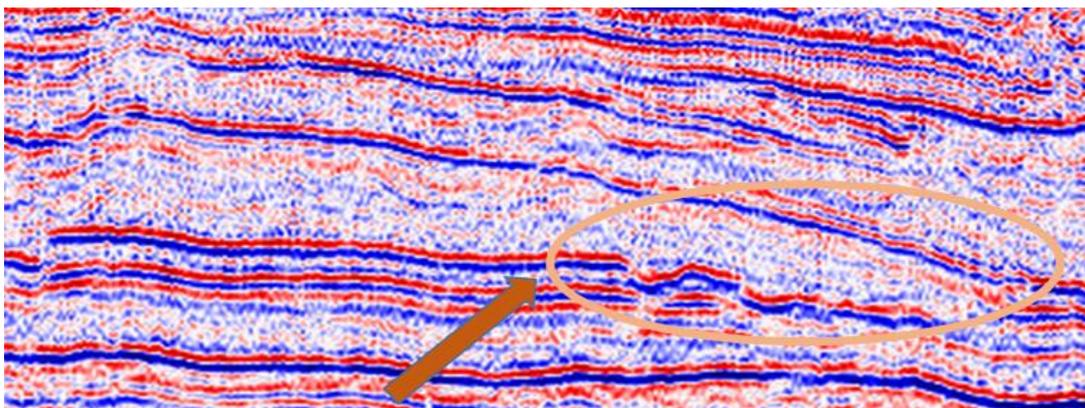


Рис. 3. Приклад виклинювання піщаних порід.
Fig. 3. Example of wedging of sandstones

Виявлення літологічних об'єктів. В окремих випадках кореляція сейсмічних відбиттів за екстремумами фаз є скрутною і виконується з використанням динамічних особливостей сейсмічного поля [4]. Сейсмічні часові розрізи піддаються сеймостратиграфічному аналізу, у якому виділяються зони зі своєрідними малюнками осей синфазності і зазвичай відповідають геологічним літофаціям. Переривчасті та лентукулярні відображення типові для локалізованих піщаних тіл (аккумулятивні піщані тіла, палерусла, бари) (рис. 4, 5) і можуть бути пов'язані з неструктурними покладами вуглеводнів.

Ці об'єкти мають високу первинну пористість і власне є покладами вуглеводнів.

Піщані утворення русел і дельт, барів, клиноформ зазвичай оточені щільними породами, їх можна визначити за набуханням товщі порід.

Прибережні морські тіла – бари виявляються по зміні потужності між горизонтальними відбиттями у нижній частині та хорошими відбиттями у верхній частині.

Акумулятивні піщані тіла пов'язані з яскраво вираженими характерними закономірностями в сейсмічних записах - поверхня палеорек фіксується увігнутою формою осей синфазності, що відбивається додатковими відображеннями та порушенням кореляції.

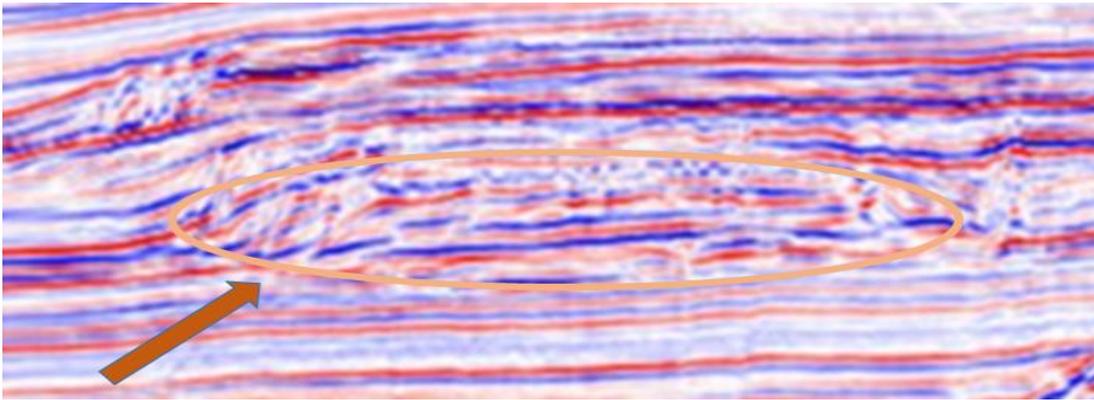


Рис. 4. Сейсмофация аккумулятивного тіла.
Fig. 4. Seismofacies of the accumulative body

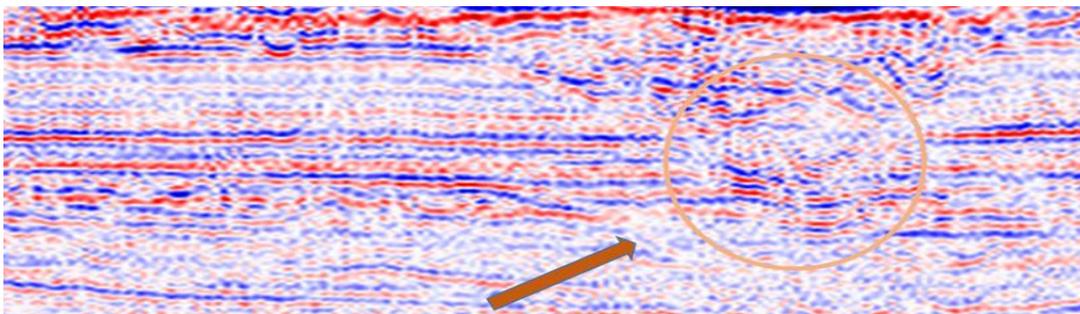


Рис. 5. Сейсмофация палеоруслу.
Fig. 5. Seismofacies of the paleochannel

У карбонатних розрізах плямиста чи невпорядкована сейсмічна картина часто показує розвиток рифових органогенних масивів та біогермічних споруд (рис. 6). Рифовий масив визначається по відсутності відбиття, тобто, з припинення простежування осей синфазності всередині рифу, оскільки масив складний однорідними карбонатними породами. На сейсмічних розрізах, орієнтованих на хрест протягування таких органогенних споруд, спостерігаються характерні сейсмічні малюнки з характерними ознаками, які сприяють виявленню рифів. Так у предрифовій та зарифовій частинах спостерігається різний нахил осей синфазності, а надрифова товща характеризується присутністю осей облягання, різким зменшенням інтенсивності відбиттів та зміною динамічних характеристик відбитих хвиль, таких як амплітуди, частоти, а в подрифовій зоні простуджуються плоскі, увігнуті або опуклі осі синфазності.

Пластові органогенні вапняки (біостроми) характеризуються клиноподібними та пагорбовими осями синфазності по периферії пластів.

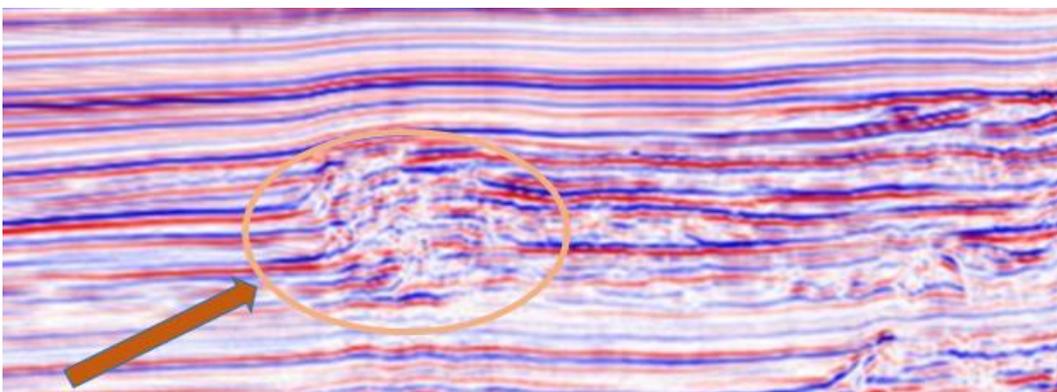


Рис. 6. Сейсмофация рифової споруди.
Fig. 6. Seismofacies of the reef structure

Сольова тектоніка. Соляні куполи як однорідна товща чітко реєструються на сейсмічних часових розрізах за характерними сейсмофаціями, де спостерігається відсутність відбитків усередині соляного діяпіру, хаотичне хвильове поле, не когерентні щодо один одного сейсмічні відображення, і дуже слабкі амплітуди відбитків [5], припинення простежування відбиття біля стінок купола і відбитків, що обгинають купол і майже горизонтальних, що підстиляють його. Контакт з діяпірами (рис. 3) завжди чітко простежується.

Сольові штоки є найкращими екранами при міграції вуглеводнів за рахунок власної щільності. Біля штоків створюються поклади нафти та газу. І саме цим областям приділяється більша увага, оскільки вони безпосередньо беруть участь у формуванні родовищ та впливають на якість нафтогазових покладів.

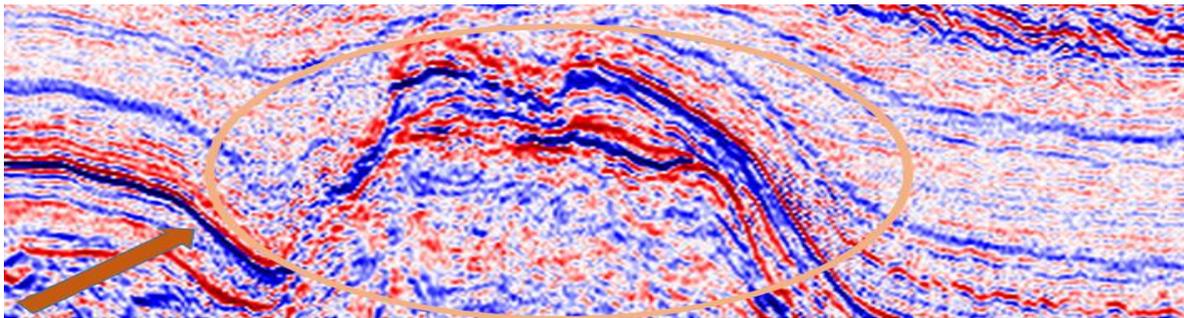


Рис. 7. Сейсмофація соляного діяпіру.

Fig. 7. Seismofacies of the salt diapir.

Інтерпретація розривних порушень. За наявності у розрізі скидів, підкидів, насувів та інших порушень, що утворюють напівграбени та горстові блоки, мають сильний вплив на розподіл колекторів. У малюнку з'являються характерні риси сейсмічного запису – розриви суцільності осей синфазності, які супроводжуються переміщенням окремих частин геологічних тіл одне щодо одного. Може також спостерігатись значне згасання амплітуди без розриву суцільності фази або поява подібних форм відбитих хвиль з помітним зрушенням по глибині. Залежно від характеру тектонічного порушення (рис. 8, 9) осі синфазності простежуються з обох боків від нього, можуть перекриватися чи утворювати зону відсутності відбитків хвильового поля.

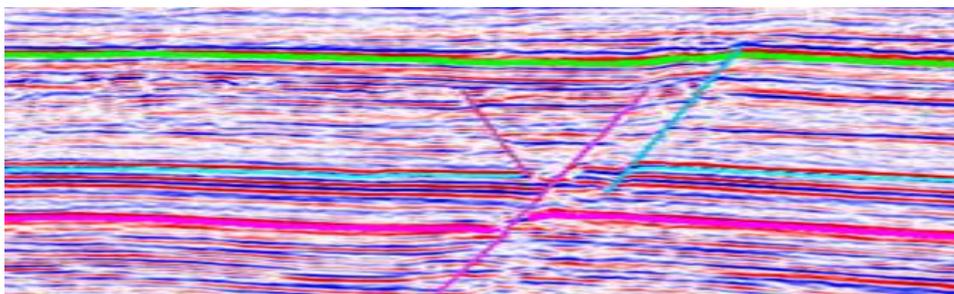


Рис. 8. Фрагмент часового розрізу з інтерпретацією розривних порушень.

Fig. 8. Fragment of a temporal incision with interpretation of the incisional violations.

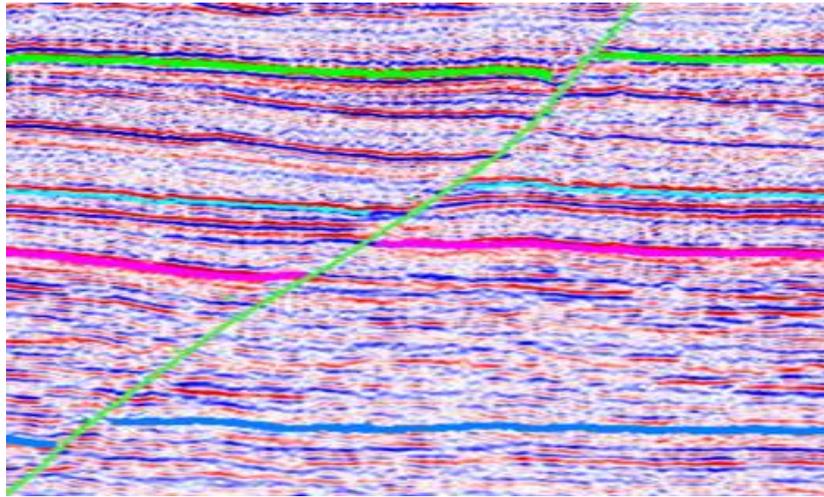


Рис. 9. Фрагмент часового розрізу з інтерпретацією тектонічного порушення - типу «скид».
Fig. 9. Fragment of a time section with an interpretation of a tectonic disturbance - type "thrust".

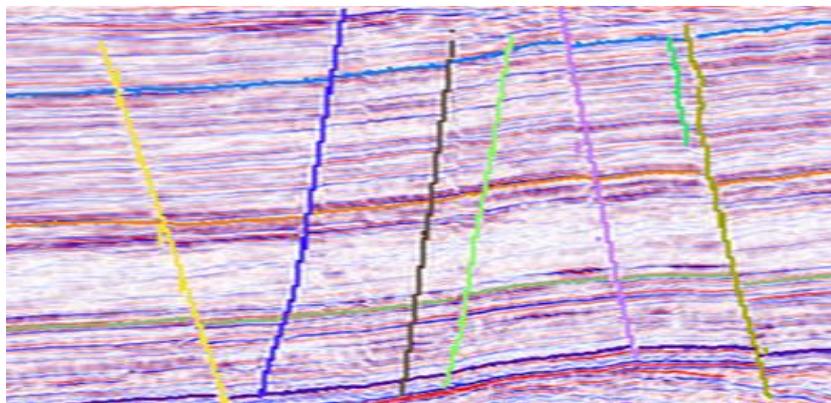


Рис. 10. Фрагмент часового розрізу з інтерпретацією системи тектонічних порушень.
Fig. 10. Fragment of a time section with an interpretation of the system of tectonic disturbances

Іноді зони порушень виділяються із згасання амплітуд. Часто в подібних зонах взагалі не вдається простежити відбиваючий горизонт. Доцільно виконувати кореляцію, слідуючи від центральних (непорушених) частин тектонічних блоків, підходячи однойменним відображенням до площини тектонічного порушення з різних боків. Необхідно простежити той самий розлом по всій його протяжності. Потрібно знайти однакові закономірності. Це може бути змішання тих самих горизонтів, близька відстань між розрізами, подібний сейсмічний запис. При цьому десь у процесі простеження по кубу розлом може почати «загасати» або втикатися в інший розлом зі зміною амплітуди та напрямку падіння. Відстань між фазами при зміщенні по розлому (амплітуда) у верхніх горизонтах завжди менше ніж у нижніх (можливо дорівнює по всіх горизонтах). Зміна морфології горизонтів вздовж розлому підпорядковується закону послідовності напластування за яким молоді осадові гірські породи залягають вище за давні і має закономірність пов'язану з первісним горизонтальним заляганням горизонтів, що опускалися чи піднімалися відповідно до цього принципу. Процес кореляції відбитків та картування тектонічних порушень – циклічний: уточнюючи кореляцію горизонтів, ми уточнюємо положення тектонічних порушень і навпаки. Зміни сейсмічного малюнка, пов'язані з розломами, можуть свідчити про наявність тектонічно екранованих покладів, однак у тектонічно ускладнених регіонах якість інтерпретації безпосередньо нижча, що впливає на результати прогнозу.

Висновки. Сейсмічна інтерпретація є основою для виділення геологічних елементів, які мають ключовий вплив на формування нафтогазових покладів, і дозволяє просторово простежити структурні та стратиграфічні форми та їх літологічні неоднорідності.

Незважаючи на високу інформативність сейсмічних даних, інтерпретація сейсмічних малюнків супроводжується низкою невизначеностей. Один і той же тип сейсмічного малюнка може відповідати різним літологічним та фаціальним заоежностям. Крім того, якість вихідних сейсмічних матеріалів, роздільна здатність сейсморозвідки і вплив геологічних процесів можуть суттєво ускладнити інтерпретацію. У зв'язку з цим побудови на основі сейсмічних даних повинні розглядатися як передбачувані та використовуватися в комплексі з іншими геолого-геофізичними дослідженнями та методами.

Список використаної літератури:

1. Онаджіте Е. (2014). Методи аналізу сейсмічних даних у розвідці вуглеводнів. Амстердам: *Elsevier*, 232.
2. Нанда Н. К. (2016). Інтерпретація та оцінка сейсмічних даних для розвідки та видобутку вуглеводнів. *Берлін: Springer*, 281.
3. Сукмоно С., Амбарсарі Д. С. (2019). Практична сейсмічна інтерпретація для розвідки нафти. *Бандунг: ITB Press*, 148.
4. Розловська, С.Ю., Вергуненко О.П., Габловський, Б.Б. та Штогрин М.В. (2021). Можливості атрибутивного аналізу сейсмічних даних для уточнення структурних особливостей геологічного розрізу. *Нафтогазова енергетика*, 1(35), 16–24. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2021-1\(35\)-16-24](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2021-1(35)-16-24).
5. Щедрова О. В. (2022.) Особливості моделювання соляних штоків у програмному комплексі *Schlumberger Petrel*.
6. Браун А. Р. (2011). Інтерпретація тривимірних сейсмічних даних. 7-е вид. *Талса: Товариство геофізиків-розвідників*.
7. Ехінлайє, МД., Осісанья, ОВ., Ігракпата, ФС., Салех, АС., та Ібітойє, ТА. (2022). Сейсмічна інтерпретація та петрофізичний аналіз для оцінки родовища Атага, на березі дельти Нігеру, Нігерія. *Журнал прикладних наук та екологічного менеджменту*, 26 (5), 921–927. <https://doi.org/10.4314/jasem.v26i5.20>.
8. Сафа М. Г., Омран М. А., Басал А. М. К., Набаві Б. С., Кассаба М. А., Сархан М. А. (2025). Сейсмічна структурна структура та послідовна стратиграфія родовищ Бакр–Амер–Аль-Хамд, центральна частина Суецької затоки, Єгипет: наслідки для розвідки вуглеводнів. *Геомеханіка та геофізика для геоенергетики та георесурсів* 11(1) DOI: 10.1007/s40948-025-00979-7.

References:

1. Onajite, E. (2014). *Seismic Data Analysis Techniques in Hydrocarbon Exploration*. Amsterdam: Elsevier, 232 p.
2. Nanda, N. K. (2016). *Seismic Data Interpretation and Evaluation for Hydrocarbon Exploration and Production*. Berlin: Springer, 281 p.
3. Sukmono, S., & Ambarsari, D. S. (2019). *Practical Seismic Interpretation for Oil Exploration*. Bandung: ITB Press, 148 p.
4. Rozlovska, S. Yu., Verhunencko, O. P., Hablovskyi, B. B., & Shtohryn, M. V. (2021). Capabilities of attribute analysis of seismic data to clarify structural features of the geological section. *Oil and Gas Energy*, 1(35), 16–24. [https://doi.org/10.31471/1993-9868-2021-1\(35\)-16-24](https://doi.org/10.31471/1993-9868-2021-1(35)-16-24)
5. Shchedrova, O. V. (2022). Features of salt dome modeling in the Schlumberger Petrel software package.
6. Brown, A. R. (2011). *Interpretation of Three-Dimensional Seismic Data*. 7th ed. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists.
7. Ehinlaiye, M. D., Osisanya, O. W., Igrakpata, F. C., Saleh, A. S., & Ibitoye, T. A. (2022). Seismic interpretation and petrophysical analysis for the evaluation of the Ataga field, onshore Niger Delta, Nigeria. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 26(5), 921–927. <https://doi.org/10.4314/jasem.v26i5.20>.
8. Safa, M. G., Omran, M. A., Basal, A. M. K., Nabawy, B. S., Kassab, M. A., & Sarhan, M. A. (2025). Seismic structural framework and sequence stratigraphy of the Bakr–Amer–Al-Hamd fields, central Gulf of Suez, Egypt: Implications for hydrocarbon exploration. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40948-025-00979-7>.

УДК 621.926.2

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0607>**¹Вадим Михайлик,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2435-8592>, e-mail: v.mikhajlik1988@gmail.com¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОКУ РОЗЧИНУ У РОБОЧІЙ КАМЕРІ ТА КЛАПАННИХ ВУЗЛАХ ПІД ЧАС РОБОТИ РОЗЧИНОНАСОСА

АНОТАЦІЯ. Проведено аналіз процесів роботи гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором пульсації тиску. Визначено вплив гідродинамічних зусиль на нагнітальний та всмоктувальний клапани розчинонасоса. Встановлено взаємодію кульки клапана з розчином, що визначається дією сили гідродинамічного тиску на кульку з боку потоку розчину. Виникнення цієї сили відбувається за рахунок таких факторів: кумулятивного струменя розчину з отвору в сідлі клапана; впливу нормальних і дотичних напружень, що виникають у приграничному шарі на поверхні кульки й спричинені наявністю у перекачуваного середовища структурованої в'язкості. Взаємодію кульки зі структурованою рідиною розглянуто на основі розв'язку задачі Стокса.

Для розрахунку величини гідродинамічної сили визначено реологічні характеристики середовища, а також функціонально оцінено залежність гідродинамічного впливу з боку потоку на кульку клапана в процесі його роботи в обмеженому навколочлапанному просторі.

Встановлено на основі закону руху поршня, залежності спрацювання (руху) кульок нагнітального та всмоктувального клапана гідроприводного однопоршневого розчинонасоса з комбінованим компенсатором пульсації тиску залежно від рухомості розчину П8, П10, П12.

Визначено масову частку витрати розчину через сідло всмоктувального клапана.

Ключові слова: гідроприводний однопоршневий розчинонасос, комбінований компенсатор збільшеного об'єму, нагнітальний та всмоктувальний клапани, кулька клапана, гідродинамічна сила, реологічні характеристики середовища задача Стокса, закон Ньютона.

STUDY OF SOLUTION FLOW IN THE WORKING CHAMBER AND VALVE ASSEMBLY DURING SOLUTION PUMP OPERATION

ABSTRACT. The analysis of the working processes of a hydraulically driven slurry pump with a combined pressure pulsation compensator was carried out. The influence of hydrodynamic forces on the discharge and suction valves of the slurry pump was determined. The interaction of the valve ball with the solution was established, which is determined by the action of the hydrodynamic pressure force on the ball from the side of the solution flow. The emergence of this force occurs due to the following factors: a cumulative jet of solution from the hole in the valve seat; the influence of normal and tangential stresses that arise in the boundary layer on the surface of the ball and are caused by the presence of structured viscosity in the pumped medium. The interaction of the ball with the structured liquid was considered based on the solution of the Stokes problem.

To calculate the magnitude of the hydrodynamic force, the rheological characteristics of the medium were determined, and the dependence of the hydrodynamic influence from the flow side on the valve ball during its operation in a limited surrounding valve space was functionally evaluated.

Based on the law of piston motion, the dependence of the actuation (movement) of the balls of the discharge and suction valves of a hydraulically driven single-piston mortar pump with a combined pressure pulsation compensator depending on the mobility of the solution P8, P10, P12 was established.

The mass fraction of the solution flow through the suction valve seat was determined.

Keywords: hydraulically driven single-piston mortar pump, combined compensator of increased volume, discharge and suction valves, valve ball, hydrodynamic force, rheological characteristics of the medium, Stokes problem, Newton's law.

1. Постановка проблеми. Створення сучасного розчинонасоса який забезпечить високоефективну роботу під час перекачування будівельних та розчинних сумішей різної рухомості потребує дослідження роботи гідравлічної частини, а саме: взаємодію кульок клапанів нагнітального та всмоктувального з середовищем, що перекачується залежно від закону руху робочого органу, конструктивних особливостей робочої камери, сформованого підклапанного простору в зоні сідла клапана, раціонального об'єму робочої камери та зменшення її "шкідливого" об'єму. Теоретичні дослідження робочих процесів руху розчинного середовища вкаже на раціональні рішення з конструювання гідравлічної частини насоса таким чином, щоб забезпечити стабільний потік будівельних сумішей з урахуванням їх реологічних властивостей як в такті всмоктування, так і в такті нагнітання, що забезпечить зростання основних параметрів.

Тому необхідно провести теоретичні дослідження взаємодії компонентів гідравлічної частини розчинонасоса з перекачуванним середовищем на основі законів Неве-Стокса та Ньютона

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних досліджень вказує на те, що попередньо проводились дослідження взаємодії та спрацювання елементів конструкції гідравлічної частини однопоршневих розчинонасосів [6].

Визначено механізм взаємодії потоку розчину з кулькою й на його основі запропонована математична модель роботи кульових клапанів вільної дії у вертикальній насосній колонці з проточним плунжером. На базі цієї моделі розроблено метод оцінювання величини витоків при закритті клапанів залежно від характеру руху плунжера і реологічних властивостей перекачуваного середовища. В основу оцінювання величини витоків покладено той факт, що швидкість руху плунжера під час закриття клапана визначає, з одного боку, швидкість зворотного витоків, а з другого – швидкість посадки кульки клапана на сідло і відповідно час закриття клапана [1, 2, 4]. Тобто у випадку руху плунжера зі значною швидкістю при закритті клапана збільшується швидкість потоку, що утворює зворотний витік, але при цьому зменшується час закриття клапана. І навпаки, при повільному русі робочого органу швидкість витоків зменшується, але збільшується час закриття клапана.

Обґрунтовані основні властивості перекачуваних розчинів різної консистенції, які визначають характер взаємодії потоку з елементами гідравлічної частини розчинонасоса й рівень об'ємних втрат розчину. [1-5] Встановлені закономірності впливу реологічних властивостей розчинів різної консистенції на характер роботи клапанів і рівень тиску в робочій камері впродовж робочого циклу насоса, а також вплив пружних властивостей на рівень наповнення робочої камери розчином.

Також з урахуванням попередніх досліджень проведено дослідження взаємодії потоку розчину з елементами гідравлічної частини розчинонасосів одинарної дії з електромеханічним приводом та за синусоїдальним законом робочого органу.

3. Мета роботи. Теоретичні дослідження гідродинамічної взаємодії елементів конструкції гідравлічної частини гідроприводного розчинонасоса з перекачуванним середовищем з урахуванням закону руху робочого органу та реологічних властивостей розчинних сумішей вкажуть на результат параметрів роботи розчинонасоса при раціональних режимах технологічних процесів. Метою роботи є: 1) аналіз та оцінка гідродинамічного впливу на кульку клапана на основі розв'язку задачі Стокса; 2) на основі силового закону Ньютона визначити залежності впливу на кульки клапана залежно від закону руху робочого органу і реологічних властивостей розчинних сумішей та встановити закони руху кульок всмоктувального та нагнітального клапанів. Визначити залежності масової частки зворотних витоків розчинної суміші через клапани для подальшого дослідження її впливу на параметри розчинонасоса такі, як ступінь пульсації тиску, подача, об'ємний ККД розчинонасоса.

4. Обговорення результатів дослідження. В Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» розроблено конструкцію розчинонасоса (рис. 1) [7] з комбінованим компенсатором пульсації тиску, який має гідравлічний привод та комбінований компенсатор пульсації тиску.

Розглянемо взаємодію кульки клапана з розчином, що визначається дією сили гідродинамічного тиску на кульку з боку потоку розчину. Виникає ця сила за рахунок таких факторів: кумулятивного струменя розчину з отвору в сидлі клапана; вплив нормальних і дотичних напружень, що виникають у приграничному шарі на поверхні кульки й спричинені наявністю у перекачуваного середовища структурованої в'язкості.

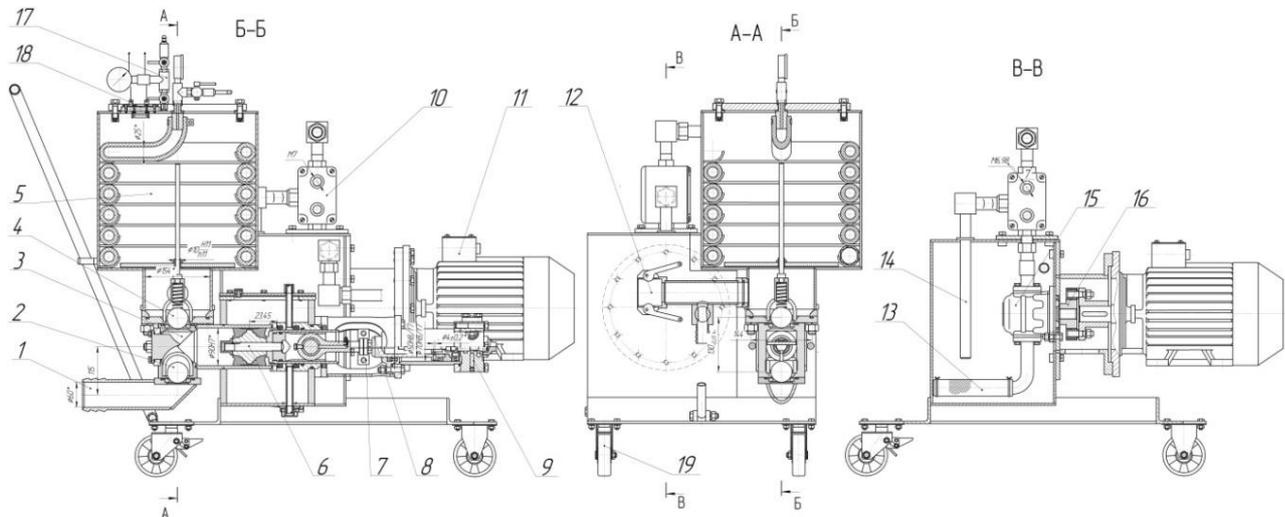


Рис. 1. Конструктивна схема однопоршневого гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму: 1, 12 – усмоктувальний та нагнітальний патрубков; 2, 4 – всмоктувальний та нагнітальний підпружинений кульові клапани; 3 – усмоктувальна камера; 5 – комбінований компенсатор; 6 – поршень з направляючим плунжером; 7 – хомут гідрравлічний привідний циліндр з розподілювачем; 8 – гідроциліндр з поршнем і штоком; 9 – золотниковий розподільник; 10 – регулятор подачі гідрравлічної рідини; 11 – електродвигун; 13 – фільтр мастильної рідини; 14 – патрубков скидання гідрравлічної рідини; 15 – шестерневий гідрравлічний насос; 16 – муфта втулково-пальцева; 17 – редуктор підкачки повітря; 18 – скляне віконце з освітленням

Fig. 2. Structural scheme of a single-piston hydraulic solution pump with a combined compensator of increased volume: 1, 12 - suction and discharge nozzle; 2, 4 - suction and discharge spring-loaded ball valves; 3 - suction chamber; 5 - combined compensator; 6 - a piston with a guide plunger; 7 - clamp hydraulic drive cylinder with a distributor; 8 - hydraulic cylinder with piston and rod; 9 - spool distributor; 10 - hydraulic fluid supply regulator; 11 - electric motor; 13 - lubricating fluid filter; 14 - hydraulic fluid discharge nozzle; 15 - gear hydraulic pump; 16 - sleeve-finger clutch; 17 - air pumping reducer; 18 - glass window with lighting

Тому, для визначення сили гідродинамічного тиску F_{20} діє залежність [2, 4]

$$F_{20} = F_c + F_m, \quad (1)$$

де F_c – сила лобового тиску з боку кумулятивного струменя розчину з отвору в сидлі; F_m – сила бокового тертя при обтіканні кульки структурованою рідиною.

Сили F_c лобового тиску на кульку з боку кумулятивного струменя та бокового тертя F_m при обтіканні кульки структурованою рідиною в обмеженому просторі мають тотожний вплив, що і під час опускання кульки у нерухомому розчині (див. рис. 2) [2, 3, 4].

Тому сила взаємодії кульки клапана з розчином може бути представлена як результуюча елементарних сил тисків і тертя на поверхні кульки [2, 3, 4]:

$$\begin{aligned}
 F_{z\theta} &= \int_0^\pi \left(-\frac{3}{2} \cdot \frac{v_n \cdot \mu}{r_k} \cos \theta \right) \cdot \cos \theta \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_k^2 \cdot \sin \theta d\theta + \\
 &+ \int_0^\pi \left(\tau_0 + \frac{3}{2} \cdot \frac{v_n \cdot \mu}{r_k} \sin \theta \right) \sin \theta \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_k^2 \cdot \sin \theta d\theta = \\
 &= 2 \cdot \pi \cdot v_n \cdot r_k \cdot \mu + 4 \cdot \pi \cdot v_n \cdot r_k \cdot \mu + \pi^2 \cdot r_k^2 \cdot \tau_0 = \\
 &= 6 \cdot \pi \cdot v_n \cdot r_k \cdot \mu + \pi^2 \cdot r_k^2 \cdot \tau_0
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

де v_n – швидкістю потоку; μ – структурована в'язкість середовища; r_k – а геометричними параметрами кульки; τ_0 – напруження зсуву розчину.

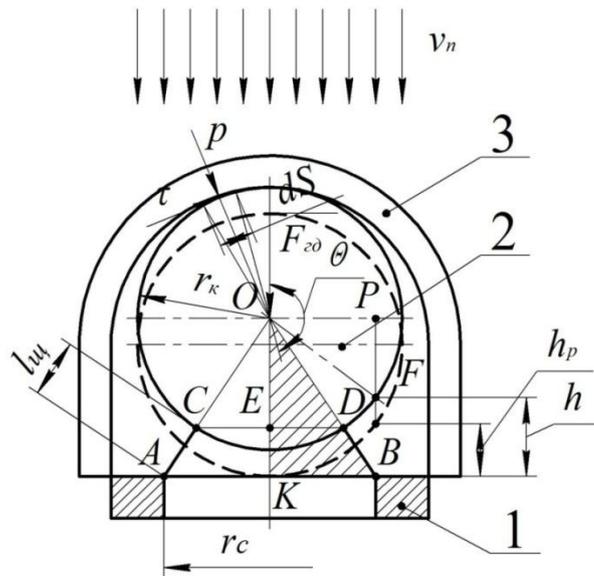


Рис. 2. Розрахункова схема взаємодії кульки клапана з потоком структурованої рідини: 1 – сідло клапана; 2 – кулька клапана; 3 – обмежувач підйому кульки клапана

Fig. 2. Calculation diagram of the interaction of the valve ball with the flow of structured fluid: 1 – valve seat; 2 – valve ball; 3 – valve ball lift limiter

Із залежності (2) видно, що прояв опору тертя більш значний порівняно з лобовим опором, а третій доданок суми визначає складову сумарного зусилля, потрібну для зрушення кульки відносно розчину, який створює статичний опір її руху, спричинений наявністю напруження τ_0 , і не залежить від структурованої в'язкості розчину μ та швидкості відносного руху. Залежність (2) є розв'язком задачі Стокса для взаємодії кульки зі структурованою рідиною.

Для розрахунку величини гідродинамічної сили необхідно визначити реологічні характеристики μ і τ_0 середовища, а також функціонально оцінити залежність гідродинамічного впливу з боку потоку на кульку клапана в процесі його роботи в обмеженому навколосітковому просторі.

За конструктивними особливостями клапанного вузла, присутність сідла та обмежувача підйому кульки клапана, силу тиску F_c на кульку з боку кумулятивного струменя, можна вважати пропорційною середній швидкості потоку v_n , яка присутня у отворі сідла, а сила третього опору F_m на поверхні кульки пропорційна середній швидкості потоку v_n у міделевому перерізі кульки (див. рис. 2).

За умови, якщо на початку зрушення кульки її швидкість відносно розчину v_k близька

до нуля, тоді вираз (2) з урахуванням $v_k = v_n$ матиме вигляд [2, 3, 4]:

$$F_\tau = \pi^2 \cdot r_k^2 \cdot \tau_0, \quad (3)$$

Граничне напруження зсуву τ_0 з урахуванням Архімедової сили за залежністю матиме вигляд:

$$\tau_0 = \frac{F_0 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_k^3 \cdot g \cdot \rho}{\pi^2 \cdot r_k^2}, \quad (4)$$

де $F_A = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_k^3 \cdot g \cdot \rho$ – враховує величину сили Архімеда, яка діє на кульку; ρ – щільність досліджуваного розчину, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Величина структурованої в'язкості розчину з урахуванням Архімедової сили [2, 3] визначаємо за залежністю матиме вигляд:

$$\mu = \frac{F_\mu - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_k^3 \cdot g \cdot \rho - \pi^2 \cdot r_k^2 \cdot \tau_0}{6 \cdot \pi \cdot v_k \cdot r_k}, \quad (5)$$

де F_μ – опір опусканню кульки з боку розчину, Н; v_k – швидкість руху кульки у нерухомому розчині, м/с; r_k – радіус кульки, м.

Одержані математичні залежності (4) і (5) дозволяють на основі експериментального вимірювання параметрів F_0 , F_μ та v_k руху кульки радіусом r_k у розчині розрахувати величини граничного напруження зсуву τ_0 і коефіцієнта структурованої в'язкості μ розчину, які визначають характер взаємодії потоку з елементами гідравлічної частини розчинонасоса.

На основі виразу (2), наведених припущень, від конструктивних параметрів клапанного вузла та характеристик потоку залежність сили гідродинамічного тиску має вигляд

$$F_{z0} = C_p \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot v_c + C_\tau \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot v_{mid} + \pi^2 \cdot r_{кл}^2 \cdot \tau_0, \quad (6)$$

де $r_{кл}$ – радіус кульки клапана, м; v_c – швидкість потоку, що виходить із отвору сідла, м/с; v_{mid} – швидкість потоку у міделевому перерізі, м/с; μ – коефіцієнт структурованої в'язкості розчину, Па·с; τ_0 – граничне напруження зсуву розчину, Па; C_p , C_τ – коефіцієнти лобового тиску і третьового опору.

Слід зауважити, що при суцільному обтіканні кульки у безмежному об'ємі в усмоктувальній камері введені коефіцієнти дорівнюють: $C_p = 2$, $C_\tau = 4$.

Характер зміни сили тиску кумулятивного струменя на кульку визначається коефіцієнтом C_p і залежить від висоти підйому кульки, її діаметра та діаметра отвору сідла. Параметр C_τ виразу (6) характеризує вплив обмеженості потоку, який омиває поверхню кульки і визначається за конструктивними умовами клапанної камери. Коефіцієнти C_p та C_τ визначалися на основі експериментального вивчення процесу взаємодії кульки з розчином в обмеженому просторі за допомогою фізичного моделювання [2, 3].

У процесі роботи клапана відбувається перерозподіл швидкостей потоку в характерних перерізах клапанного вузла. Цей процес описується законом Вестфала [2, 3, 8], за яким при русі кульки у напрямі потоку витрата розчину через отвір сідла більша, ніж витрата розчину через клапанну щілину (рис. 2).

Витрати розчину, що займає підклапанний простір при підйомі кульки, можна представити залежністю

$$Q_{кл} = v_{кл} \cdot S_c, \quad (7)$$

де $v_{кл}$ – швидкість руху кульки клапана, м/с.

Оскільки витрата розчину через отвір сідла дорівнює витраті розчину у всмоктувальній камері $Q_{в.к.}$, тому

$$Q_c = Q_{в.к.} = \frac{1}{\cos \beta} \cdot v_n \cdot \frac{D_n^2}{d_c^2} \cdot S_n, \quad (8)$$

де v_n – швидкість поршня, м/с; S_n – площа контактної частини поршня з розчином, м²; D_n – діаметр поршня; d_c – діаметр сідла клапана; β – кут нахилу спеціальної вставки.

При відкриванні клапана кулька рухається у напрямку потоку, відносна швидкість обтікання кульки потоком зменшиться на величину її швидкості, тобто вираз (6) матиме вигляд

$$F_{з\partial} = C_p \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot (v_c - v_{кл}) + C_\tau \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot (v_{mid} - v_{кл}) + \pi^2 \cdot r_{кл}^2 \cdot \tau_0. \quad (9)$$

Ураховуючи те, що $v_c = v_n \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot \frac{S_n}{S_c}$, а $v_{mid} = \frac{v_n \cdot S_n - v_{кл} \cdot S_c}{S_{mid}} \cdot \frac{1}{\cos \beta}$ (див. (1) –

(3)), залежність сили гідродинамічного тиску матиме вигляд

$$F_{з\partial} = C_p \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot \left(v_n \cdot \frac{S_n}{S_c} \cdot \frac{1}{\cos \beta} - v_{кл} \right) + C_\tau \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot \left(\frac{v_n \cdot S_n - v_{кл} \cdot S_c}{S_{mid}} \cdot \frac{1}{\cos \beta} - v_{кл} \right) + \pi^2 \cdot r_{кл}^2 \cdot \tau_0. \quad (10)$$

де S_c , $S_{щ}$, S_{mid} – площі перерізів отвору сідла, щілини та міделева відповідно, м²; v_c , $v_{щ}$, v_{mid} – середні швидкості потоку в отворі сідла, щілини і міделевому перерізі відповідно, м/с.

Позначивши поточну висоту підйому кульки над сідлом координатою x , залежність (9) буде у вигляді

$$F_{з\partial} = C_p \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot \left(v_n \cdot \frac{S_n}{S_c} \cdot \frac{1}{\cos \beta} - \dot{x} \right) + C_\tau \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot \left(\frac{v_n \cdot S_n - \dot{x} \cdot S_c}{S_{mid}} \cdot \frac{1}{\cos \beta} - \dot{x} \right) + \pi^2 \cdot r_{кл}^2 \cdot \tau_0, \quad (10)$$

де \dot{x} – перша похідна координати положення кульки x над сідлом, яка визначає її швидкість, тобто $v_{кл}$; S_c – площа поперечного перерізу сідла.

На рис. 3 зображено схему впливу гідродинамічних зусиль на нагнітальний та всмоктувальний клапани.

Спрацьовування клапанів відбувається біля "мертвих" точок ходу поршня: у лівій – закриття всмоктувального клапана і відкриття нагнітального; у правій – закриття нагнітального й відкриття всмоктувального (рис. 3).

Варто зазначити, що рух кульки клапана впливає не лише на рівень зворотних витоків розчину, але визначає опір просуванню потоку розчину, рівень розрідження в робочій камері та ступінь її наповнення в процесі всмоктування.

Під час роботи всмоктувального клапана процес гідралічної взаємодії та баланс сил, діючих на кульку за законом Ньютона, має вигляд

$$m_{кл} \cdot \ddot{x} = -F_{з\partial} - G + F_A, \quad (11)$$

Напрямок сили $F_{2\partial}$ визначається вектором швидкості потоку розчину v_p у навколоклапанному просторі.

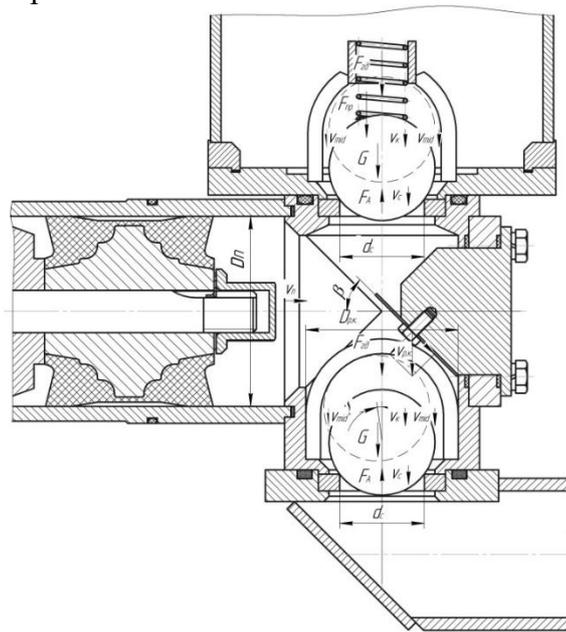


Рис. 3. Розрахункова схема впливу гідродинамічних зусиль на нагнітальний та всмоктувальний клапани гідроприводного однопоршневого розчинонасоса з комбінованим пульсації тиску
 Fig. 3. Calculation scheme of the influence of hydrodynamic forces on the discharge and suction valves of a hydraulically driven single-piston mortar pump with combined pressure pulsation

Розроблені залежності (10) та (11) указують на те, що сила $F_{2\partial}$ прямо пропорційна швидкості потоку розчину, яка визначається швидкістю \bar{v}_n руху поршня, і залежить від положення кульки, геометричних розмірів клапанного вузла й характеристик розчину. У загальному вигляді силу $F_{2\partial}$ можна представити як

$$F_{2\partial} = f(x_{кл}, \dot{x}_{кл}, v_n, \mu, \tau_0, r_{кл}, r_c, D_{нкл}) \quad (12)$$

де $x_{кл}$ – координата, що визначає миттєве положення кульки над сідлом; $\dot{x}_{кл}$ – миттєва швидкість кульки ($v_{кл}$) у положенні $x_{кл}$; v_n – швидкість поршня $v_n = \frac{Q_0}{S - S'}$ (див. п. 2.2); μ, τ_0 – реологічні характеристики розчину, що залежать від його рухомості; $r_{кл}, r_c$ – радіуси кульки та отвору сідла; $D_{нкл}$ – діаметр навколоклапанної порожнини.

З урахуванням залежностей (1), (12) вираз (11) можна представити у вигляді диференціальної залежності

$$m_{кл} \cdot \ddot{x}_{кл} = -F_{2\partial}(x_{кл}, \dot{x}_{кл}, v_n, \mu, \tau_0, r_{кл}, r_c, D_{нкл}) - m_{кл} \cdot g + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{кл}^3 \cdot g \cdot \rho. \quad (13)$$

Остаточно

$$m_{кл} \cdot \ddot{x}_{кл} = - \left[C_p \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot \left(v_n \cdot \frac{S_n}{S_c} \cdot \frac{1}{\cos \beta} - \dot{x} \right) + C_t \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot \left(\frac{v_n \cdot S_n - \dot{x} \cdot S_c}{S_{mid}} \cdot \frac{1}{\cos \beta} - \dot{x} \right) + \pi^2 \cdot r_{кл}^2 \cdot \tau_0 \right] - m_{кл} \cdot g + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{кл}^3 \cdot g \cdot \rho. \quad (14)$$

При розгляді відкриття клапана ($m_{кл} \cdot \ddot{x}_{кл} > 0$) початковою умовою є $x_{кл}(t_0) = 0$, що

відповідає нижньому положенню кульки. При закритті клапана ($m_{кл} \cdot \ddot{x}_{кл} < 0$) початковою умовою є $x_{кл}(t_0) = 0$ (верхнє положення кульки).

При роботі нагнітального клапана процес гідравлічної взаємодії відрізняється від попереднього випадку тим, що на кульку впливає стовп розчину з комбінованого компенсатора та вплив сили пружного елемента, баланс сил, діючих на кульку, має вигляд

$$m_{кл} \cdot \ddot{x} = -F_{z0} - G - F_{np} + F_A. \quad (15)$$

Сила опору пружного елемента, що діє на кульку клапана

$$F_{np1} = \frac{G_M \cdot d_{np}^4 \cdot f_1}{8 \cdot D_0^3 \cdot n_{np}} \cdot \frac{1}{\chi_{он}} = \frac{G_M \cdot d_{np}^4 \cdot (H_0 - H_1)}{8 \cdot (D_1 - d_{np})^3 \cdot n_{np}} \cdot \frac{1}{\chi_{он}}, \quad (16)$$

де G_M – модуль зсуву матеріалу (тиск, що викликає деформацію на 1 мм), МПа; d_{np} – діаметр проволоки пружини, мм; D_0 – середній діаметр пружини, мм; D_1 – зовнішній діаметр пружини, мм; H_0 – довжина пружини у вільному стані, мм; H_1 – довжина ходу пружини на довжину ходу кульки нагнітального клапана, мм; f_1 – зміна довжини пружини при стисненні кулькою нагнітального клапана; n_{np} – кількість витків пружини; $\chi_{он}$ – коефіцієнт опору руху пружини в залежності від густини перекачуваного середовища.

З урахуванням залежностей (1), (12) та (16) вираз (15) можна записати у вигляді диференціального рівняння

$$m_{кл} \cdot \ddot{x}_{кл} = -F_{z0}(x_{кл}, \dot{x}_{кл}, v_n, \mu, \tau_0, r_{кл}, r_c, D_{кл}) - m_{кл} \cdot g - \frac{G_M \cdot d_{np}^4 \cdot (H_0 - H_1)}{8 \cdot (D_1 - d_{np})^3 \cdot n_{np}} \cdot \frac{1}{\chi_{он}} + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{кл}^3 \cdot g \cdot \rho. \quad (17)$$

Остаточно

$$m_{кл} \cdot \ddot{x}_{кл} = - \left[C_p \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot \left(\left(\frac{Q_0}{S - S'} \right) \cdot \frac{S_n}{S_c} - \dot{x} \right) + C_\tau \cdot \pi \cdot \mu \cdot r_{кл} \cdot \left(\frac{\left(\frac{Q_0}{S - S'} \right) \cdot S_n - \dot{x} \cdot S_c}{S_{mid}} - \dot{x} \right) + \pi^2 \cdot r_{кл}^2 \cdot \tau_0 \right] - m_{кл} \cdot g - \frac{G_M \cdot d_{np}^4 \cdot (H_0 - H_1)}{8 \cdot (D_1 - d_{np})^3 \cdot n_{np}} \cdot \frac{1}{\chi_{он}} + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{кл}^3 \cdot g \cdot \rho. \quad (18)$$

У зв'язку з цим доцільно зробити припущення, що вплив закону руху робочого органу насоса має подвійний характер, тобто визначає не лише час закриття клапана, але й величину ходу поршня за цей час, яка безпосередньо характеризує об'єм втрат розчину. Тобто, вибір закону руху робочого органу потребує раціоналізації за часом закриття клапана та інтенсивності руху в цей період.

Аналіз роботи кульового клапана однопоршневого розчинонасоса на основі розглянутої динамічної моделі дає можливість установити закон руху кульки при роботі клапана з урахуванням конструктивних параметрів клапанного вузла, закону руху робочого органу і властивостей перекачуваного середовища та теоретично оцінити вплив закону руху привода на ефективність роботи нагнітального й всмоктувального клапанів, урахуваючи втрати розчину при їх закритті.

Розв'язання цього диференціального рівняння дає можливість одержати закон руху кульки клапана як функцію

$$x_{кл}(t) = f(m_{кл}, r_{кл}, r_c, D_{нкл}, v_n(t), \mu, \tau_0, \rho, t), \quad (19)$$

яка встановлює залежність між характером переміщення кульки за часом t і конструктивними параметрами клапана ($m_{кл}, r_{кл}, r_c, D_{нкл}$), законом руху поршня ($v_n(t)$) та властивостями перекачуваного розчину (μ, τ_0, ρ). За допомогою цієї залежності можна визначити час закриття й відкриття клапана. Розв'язання рівняння (13) з урахуванням (10) можна виконати лише з використанням чисельних методів розв'язання диференціальних рівнянь на ЕОМ та потребує попередніх експериментальних уточнень параметрів взаємодії кульки клапанів з розчином.

Початкове зрушення кульки діаметром 50 мм у розчині рухомістю П10 см здійснювалося при сумарній масі 510 г, тобто сила початкового зсуву $F_0 = 9,81 \cdot 0,51 = 5$ Н.

На рис. 4 наведено залежності руху кульок нагнітального та всмоктувального клапана залежно від рухомості розчину та в табл. 1 реологічні параметри будівельних розчинів різної рухомості [1], зусилля зрушення кульки у розчинах та її швидкість початкового руху у розчинах.

Таблиця 1. Реологічні та силові параметри піщаних розчинів різної рухомості для визначення законів руху кульок нагнітального та всмоктувального клапанів

Table 1. Rheological and force parameters of sand solutions of different mobility for determining the laws of motion of balls of discharge and suction valves

Рухомість розчину, см	Щільність ρ , кг/м ³	Граничне напруження зсуву τ_0 , Па	Коефіцієнт структурованої в'язкості μ , Па·с	Зусилля руху, F_1 Н	Швидкість руху v_0 , м/с
П8	2100	736,27	35,86	15,3	0,74
П10	2000	602,39	18,58	11,75	1,06
П12	1900	431,24	10,24	7,86	1,2

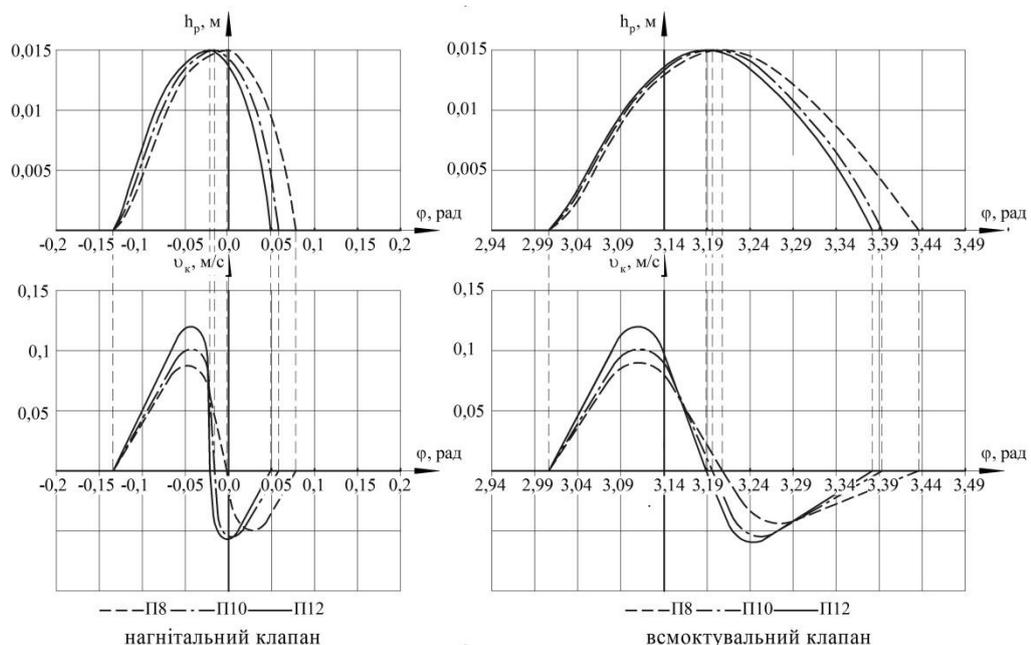


Рис. 4. Залежності руху кульок нагнітального та всмоктувального клапана однопоршневого розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму залежно від рухомості розчину
 Fig. 4. Dependences of the movement of the balls of the discharge and suction valves of a single-piston mortar pump with a combined compensator of increased volume depending on the mobility of the mortar

Залежності (рис. 4, 5) вказують на те, що у гідроприводного розчинонасоса спрацювання нагнітального та всмоктувального клапанів відбувається швидше за рахунок стабільної постійної швидкості руху за період спрацювання по відношенню до клапанів розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму відповідно на $0,024^\circ$ і $0,018^\circ\text{c}$ за цикл роботи.

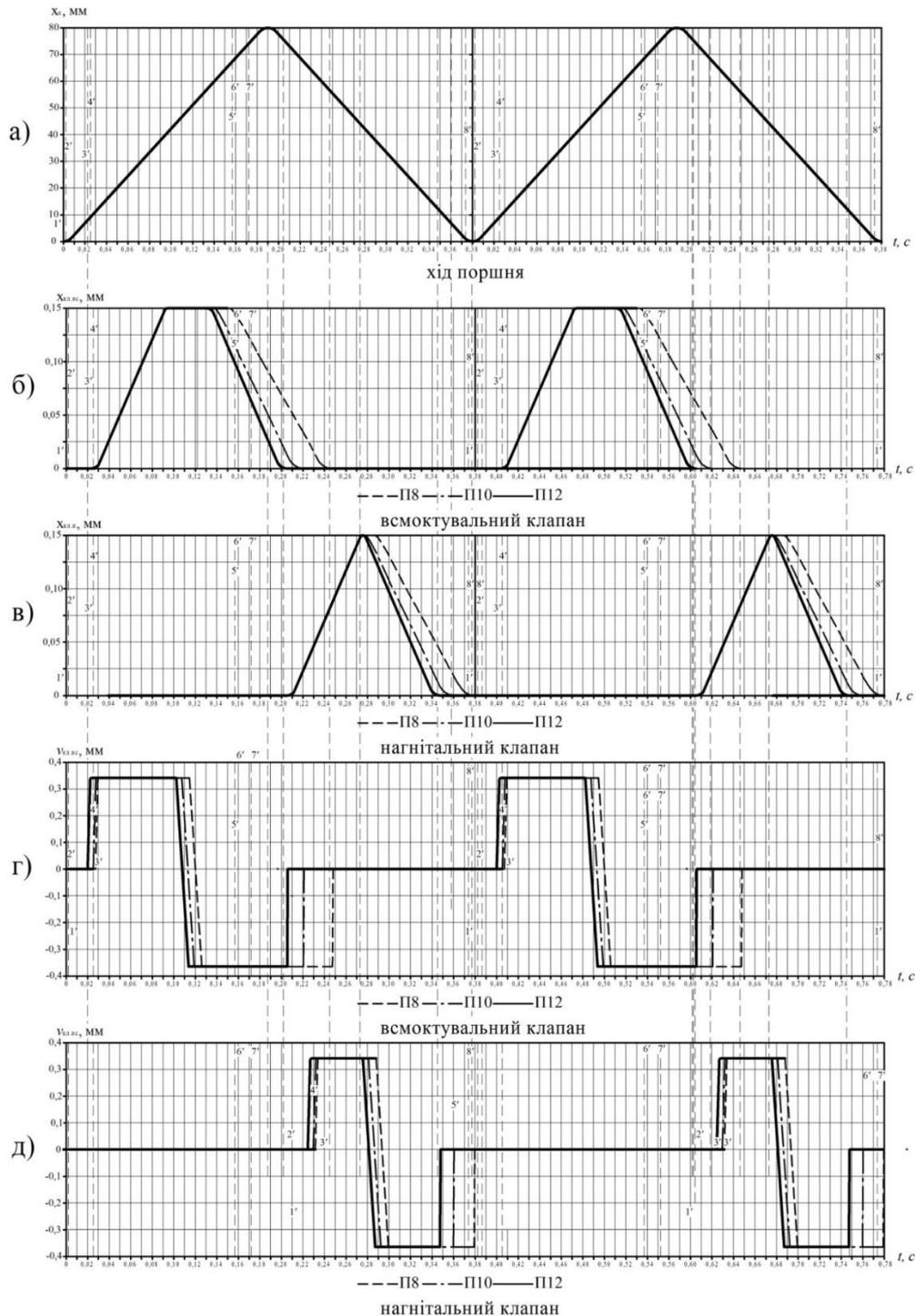


Рис.5. Залежності руху поршня, кульок нагнітального та всмоктувального клапана гідроприводного однопоршневого розчинонасоса з комбінованим компенсатором пульсації тиску залежно від рухомості розчину П8, П10, П12

Fig. 5. Dependences of the movement of the piston, balls of the discharge and suction valves of a hydraulically driven single-piston mortar pump with a combined pressure pulsation compensator depending on the mobility of the mortar P8, P10, P12

Граничне напруження зсуву τ_0 та величина структурованої в'язкості розчину рухомістю П10 будуть рівні

$$\tau_0 = \frac{F_0 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_k^3 \cdot g \cdot \rho}{\pi^2 \cdot r_k^2} = \frac{5 - \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 0,025^3 \cdot 9,81 \cdot 2000}{3,14^2 \cdot 0,025^2} = 602,39 \text{ Па,}$$

$$\mu = \frac{F_\eta - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_k^3 \cdot g \cdot \rho - \pi^2 \cdot r_k^2 \cdot \tau_0}{6 \cdot \pi \cdot \nu_k \cdot r_k} =$$

$$= \frac{11,75 - \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 0,025^3 \cdot 9,81 \cdot 2000 - 3,14 \cdot 0,025^2 \cdot 602,39}{6 \cdot 3,14 \cdot 1,06 \cdot 0,025} = 5,92 \text{ Па} \cdot \text{с.}$$

Варто зазначити, що швидше спрацювання кульок клапанів за рахунок постійної швидкості підйому і опускання у гідроприводного розчинонасоса, а саме швидше його опускання на гніздо впливає не лише на зменшення зворотних витоків розчину, але й визначає опір просуванню потоку розчину, спонукає високому рівню розрідження в робочій камері та ступеню її наповнення під час всмоктування завдяки чому, це суттєво впливає на зменшення ступеня пульсацій тиску та зростання об'ємного ККД.

Установлення закону руху кульки дозволить визначити час її руху з висоти h до сідла та оцінити величину зворотних витоків ΔV при закритті клапана

$$\Delta V = S_{\bar{\sigma}} \cdot \frac{1}{\cos \psi} \cdot S_n(\varphi_3), \quad (20)$$

де $S_{\bar{\sigma}}$ – величина бокової поверхні відкриття клапана залежно від висоти підйому кульки $S_{\bar{\sigma}} = f(h)$, м²; ψ – кут зміни траєкторії руху кульки клапана, який виникає в результаті бакового зусилля.

На основі даного аналізу масову частку витрати розчину через сідло всмоктувального клапана визначається залежністю

$$\Delta Q_{вс.кл} = \rho \cdot \nu_{p.к.} \cdot S_n - \rho \cdot \nu_c \cdot S_{\bar{\sigma}} = \rho \cdot \nu_n \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot \frac{D_n^2}{d_{p.к}^2} \cdot S_n - \rho \cdot \nu_n \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot \frac{D_n^2}{d_c^2} S_{\bar{\sigma}} =$$

$$= \rho \cdot \nu_{p.к.} \cdot S_n - \rho \cdot \nu_c \cdot S_{\bar{\sigma}} = \rho \cdot \frac{Q_0}{S - S'} \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot \frac{D_n^2}{d_{p.к}^2} \cdot S_n - \rho \cdot \frac{Q_0}{S - S'} \cdot \frac{1}{\cos \beta} \cdot \frac{D_n^2}{d_c^2} S_{\bar{\sigma}}$$

Після перетворень маємо

$$\Delta Q_{вс.кл} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot D_n^4}{\cos \beta} \cdot \left(\frac{Q_0}{S - S'} \right) \cdot \left(\frac{D_n^2}{4 \cdot d_{p.к}^2} - \frac{R_k}{d_c^2} \cdot \frac{h^2 + 2 \cdot h \cdot \sqrt{R_k^2 - r_c^2}}{\sqrt{r_c^2 + \left(h + \sqrt{R_k^2 - r_c^2} \right)^2}} \right), \quad (22)$$

де – $S_n(\varphi_3)$ – переміщення поршня за час закриття клапана, яке характеризується законом руху поршня, м; φ_3 – кут повороту кривошипа за час t закриття клапана.

Моделювання процесу виникнення тиску у гідравлічній частині під час роботи гідроприводного розчинонасоса (здійснювали за допомогою програмного комплекс САПР SolidWorks (солідворкс, от англ. solid – тверде тіло і англ. works – працювати).

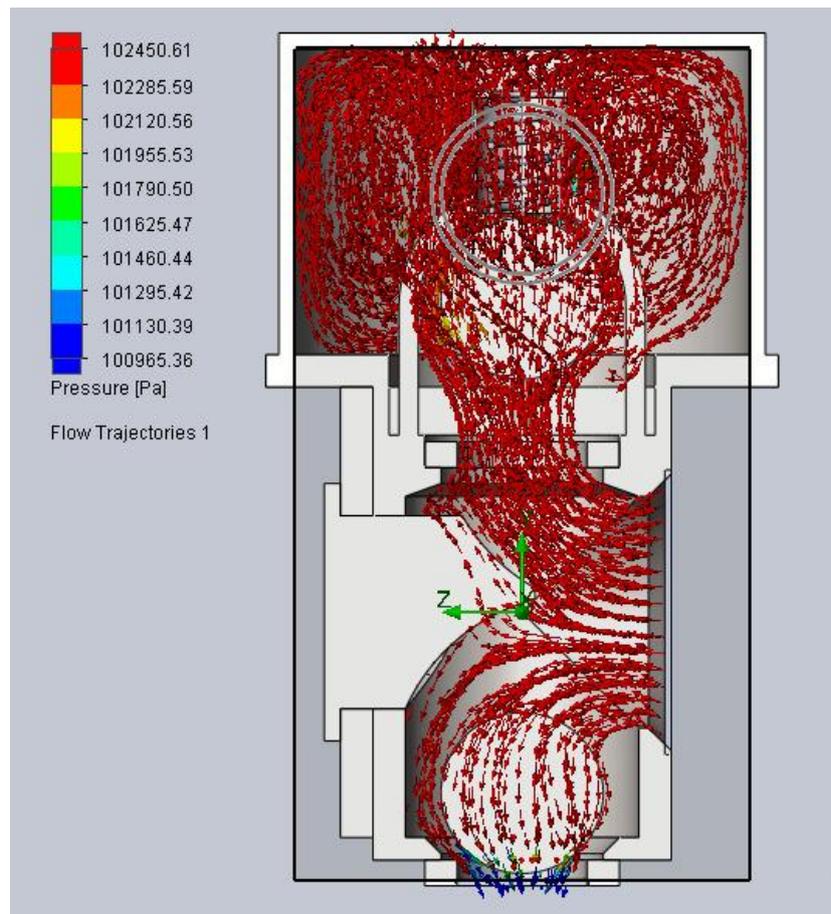


Рис. 6. Зображення процесу розподілення тиску у гідравлічній частині розчинонасоса
 Fig. 6. Image of the pressure distribution process in the hydraulic part of a mortar pump

За результатами моделювання видно, що розділення тиску у робочій камері під час руху поршня в такті нагнітання практично рівномірне окрім різкого падіння тиску у сідлі всмоктувального клапана, який з миттєвим запізненням рухається до сідла клапана зі швидкістю меншою руху потоку розчину. Стосовно розподілення тиску у вільній камері компенсатора то він розподіляється за потоком руху розчину через сідло нагнітального клапана омиваючи сферичну поверхню кульки і далі розподіляючись зростає по поверхні діаметрально. На виході з нагнітального патрубку тиск зменшується пропорційно зменшенню опору потоку розчину.

5. Висновки:

Проведено теоретичне дослідження механізму взаємодії потоку розчину з кулькою й на його основі та запропонованій математичній моделі роботи кульових клапанів всмоктувального вільної дії та підпружиненого нагнітального робочої камери з урахуванням спеціальної вставки в ній. На базі цієї моделі розроблено метод визначення об'єму зворотних витоків під час закриття клапанів залежно від закону руху поршня та реологічних властивостей перекачуваного середовища. Основою оцінювання об'єму зворотних витоків присутній той факт, що постійна швидкість руху поршня під час закриття клапана визначає, як швидкість зворотного витоків, так і швидкість встановлення кульки клапана на сідло і відповідно зменшується час закриття клапана. Отже при русі поршня з постійною швидкістю під час закриття клапана швидкість кульки більша ніж у потоку розчину при цьому зменшується, як час закриття клапана так і зворотні витоків. Це особливо помітно під час перекачування розчинів підвищеної рухомості П10-П12.

Список використаних джерел:

1. Онищенко А.Г. Методика розрахунку зворотних втрат розчину через усмоктуючий клапан вертикального диференціального розчинонасоса / А.Г. Онищенко, А.Т. Кукоба, В.У. Уст'янцев // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полт. держ. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – Вип. 3. – Полтава: ПДТУ, 1998. – С. 3-6.
2. Онищенко О.Г. Взаємодія кульки клапана розчинонасоса з потоком перекачуваного розчину / О.Г. Онищенко, А.В. Васильєв, Б.О. Коробко. // Сб. научн. трудов / ХГДТУ. – Выпуск 5. – Харьков: ХГДТУ, 2000. – С.116-118.
3. Онищенко О. Г. Вивчення руху кульки вільнодіючого клапана диференціального розчинонасоса / О.Г. Онищенко, А.В. Васильєв, Б.О. Коробко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) / Полт. держ. техн. ун-т. ім. Юрія Кондратюка. – Вип. 7. – Полтава: ПДТУ, 2001. – С. 3-8.
4. Коробко Б.О. Дослідження робочих процесів розчинонасоса з комбінованим законом руху проточного плунжера: Дис...канд. техн. наук: 05.05.02 / Коробко Богдан Олегович. – Полтава 2002. – 166 с.
5. Емельянова І.А. Визначення продуктивності та об'ємного ККД розчинонасоса залежно від геометричних параметрів усмоктувальної камери та компенсаторів різних конструктивних рішень: [Текст] / І.А. Емельянова, М.В. Шаповал // Науковий вісник будівництва. Т. 88, №2 – Х., 2017. – С. 195-203.
6. Пат. 112734 Україна, МПК F04В 11/00 Малоімпульсний насос / І.А. Ємельянова, Б. О. Коробко, М. В. Шаповал (Україна); заявник і патентовласник Полт. нац. техн. ун-т. ім. Ю. Кондратюка, № а 2015 11219; заявл. 16.11.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. №.19.
7. Шаповал М.В. Аналіз конструкції гідроприводного розчинонасоса з різними комбінованими компенсаторами / М.В. Шаповал, В.Г. Михайлик, А.І. Криворот // Технічні науки та технології. – 2025. – № 1 (39). – С. 98-108. [https://doi.org/0.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-98-108](https://doi.org/0.25140/2411-5363-2025-1(39)-98-108).
8. Клим М.М., Якібчук П.М. Молекулярна фізика. – Львів, ЛНУ ім. І.Франка, 2003. – 543с.

References:

1. Onyshchenko A.G. Methodology for calculating reverse losses of the solution through the suction valve of a vertical differential mortar pump / A.G. Onyshchenko, A.T. Kukoba, V.U. Ustyantsev // Collection of scientific papers (industry mechanical engineering, construction) / Poltava State Technical University named after Yuri Kondratyuk. – Issue 3. – Poltava: PDTU, 1998. – P. 3-6.
2. Onyshchenko O.G. Interaction of the ball of the mortar pump valve with the flow of the pumped solution / O.G. Onyshchenko, A.V. Vasiliev, B.O. Korobko. // Collection of scientific papers / KhGDTU. – Issue 5. – Kharkov: KhGDTU, 2000. – P. 116-118.
3. Onyshchenko O. G. Study of the movement of the ball of the free-acting valve of a differential mortar pump / O.G. Onyshchenko, A.V. Vasyliiev, B.O. Korobko // Collection of scientific papers (industry mechanical engineering, construction) / Poltava State Technical University named after Yuri Kondratyuk. – Issue 7. – Poltava: PDTU, 2001. – P. 3-8.
4. Korobko B.O. Investigation of the working processes of a mortar pump with a combined law of motion of a flow plunger: Dissertation...candidate of technical sciences: 05.05.02 / Korobko Bohdan Olegovich. – Poltava 2002. – 166 p.
5. Emelyanova I.A. Determination of productivity and volumetric efficiency of a mortar pump depending on the geometric parameters of the suction chamber and compensators of various design solutions: [Text] / I.A. Emelyanova, M.V. Shapoval // Scientific Bulletin of Construction. Vol. 88, No. 2 – Kh., 2017. – P. 195-203.
6. Pat. 112734 Ukraine, MPK F04B 11/00 Low-pulse pump / I.A. Emelyanova, B. O. Korobko, M. V. Shapoval (Ukraine); applicant and patent owner Polt. nat. tekhn. un-t. named after Yu. Kondratyuk, No. a 2015 11219; appl. 16.11.2015; publ. 10.10.2016, Bull. No. 19.
7. Shapoval M.V. Analysis of the design of a hydraulically driven mortar pump with various combined compensators / M.V. Shapoval, V.G. Mykhaylik, A.I. Kryvorot // Technical Sciences and Technologies. – 2025. – No. 1 (39). – P. 98-108. [https://doi.org/0.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-98-108](https://doi.org/0.25140/2411-5363-2025-1(39)-98-108).
8. Klym M.M., Yakibchuk P.M. Molecular Physics. – Lviv, I. Franko Lviv National University, 2003. – 543p.

УДК 621.9.08

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0608>**¹Микола Клименко**

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6166-8966>, e-mail: klymenko.mo@knuba.edu.ua

¹Гор Косминський

кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання технологічних процесів
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0234-7166>, e-mail: kosmyskiy.iv@knuba.edu.ua

¹Олександр Дьяченко

кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання технологічних процесів
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8199-2504>, e-mail: diachenko.os@knuba.edu.ua

¹Олексій Погребач,

аспірант кафедри машин та обладнання технологічних процесів
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8394-2805>, e-mail: pohrebach_ov-2022@knuba.edu.ua

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, 03037, м. Київ, Україна

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ТА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ У КОНЦЕПЦИЮ ЦИФРОВЫХ ДВУЙНИКОВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЛАДНАНИЯ

АНОТАЦІЯ. У роботі розроблено науково-методичні засади створення інтегрованого цифрового двійника технологічного обладнання на основі синергії метрологічного підтвердження та безперервної технічної діагностики. Запропонована трансформація статичних моделей у динамічні системи шляхом врахування фізико-механічних параметрів у реальному часі. Досліджено вплив вібраційного фону та динамічної жорсткості на параметри мікрогеометрії поверхні і геометричну точність обробки. Встановлено кореляцію між рівнем вібрації та виникненням дефектів, а також визначено частки впливу дисбалансу і автоколивань у загальному бюджеті похибки. Інтеграція запропонованих алгоритмів та вейвлет-аналізу архітектури стандарту ISO 23247 дозволяє реалізувати механізм «динамічного метрологічного підтвердження». Запропонований підхід забезпечує реалізацію стратегії Zero Defect Manufacturing та підвищення ресурсу технологічного обладнання через предиктивний сервіс за фактичним станом вузлів.

Ключові слова: стандартизація, цифрові двійники, технічні вимірювання, метрологія, технічна діагностика, контроль та забезпечення якості.

INTEGRATION OF METROLOGICAL CONFIRMATION AND TECHNICAL DIAGNOSTICS INTO THE DIGITAL TWIN CONCEPT TO ENSURE THE QUALITY OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

ABSTRACT. The paper develops the scientific and methodological foundations for creating an integrated digital twin of technological equipment based on the synergy of metrological confirmation and continuous technical diagnostics. The proposed transformation of static models into dynamic systems by incorporating physicochemical and mechanical parameters in real time. The impact of the vibration background and dynamic stiffness on surface microgeometry parameters and geometric machining accuracy has been investigated. A correlation between vibration levels and the occurrence of defects was established, and the influence shares of imbalance and self-excited oscillations in the total error budget were determined. The integration of the proposed algorithms and wavelet analysis into the ISO 23247 standard architecture enables the implementation of a "dynamic metrological confirmation" mechanism. The proposed approach ensures the implementation of the Zero Defect Manufacturing strategy and increases the service life of technological equipment through predictive maintenance based on the actual condition of the components.

Keywords: standardization, digital twins, technical measurements, metrology, technical diagnostics, quality control and assurance.

1. Постановка проблеми. Поточний етап розвитку технологічного обладнання

характеризується значною цифровізацією та переходом до концепції Industry 4.0, де ключовим елементом стають кіберфізичні системи. Разом з тим, забезпечення високої точності та експлуатаційної надійності складного технологічного обладнання залишається критичним викликом для механічної інженерії. Традиційні методи забезпечення якості, що ґрунтуються на періодичних метрологічних перевірках та регламентному обслуговуванні, дедалі частіше виявляються неефективними в умовах гнучкого автоматизованого виробництва. Вони не здатні адекватно враховувати динамічні чинники: термічні деформації вузлів, вібраційне зношування підшипникових опор та прогресуючу деградацію кінематичних ланцюгів у реальному часі.

Впровадження цифрових двійників (Digital Twins) відкриває принципово нові можливості для віртуального супроводу життєвого циклу машин. Однак більшість існуючих моделей фокусуються на інформаційному обміні, залишаючи поза увагою фундаментальні аспекти метрологічної простежуваності та фізичної природи відмов. Актуальність даного дослідження зумовлена гострою потребою у створенні методології, яка б інтегрувала результати технічної діагностики та метрологічного підтвердження безпосередньо у структуру цифрового двійника. Такий підхід дозволяє трансформувати «статичну» цифрову модель у «живу» динамічну систему, здатну прогнозувати відхилення параметрів точності ще до моменту появи браку. Це є критично важливим для реалізації стратегії Zero Defect Manufacturing (виробництво з нульовим дефектом) та підвищення ресурсу дороговартісного обладнання за рахунок предиктивного сервісу на основі фактичного технічного стану механічних вузлів.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розвиток концепції «Індустрія 4.0» та її подальша еволюція в «Індустрію 5.0» змістили фокус досліджень у галузі машинобудування від статичного моделювання до створення динамічних кіберфізичних систем. Провідну роль у цьому процесі відіграє технологія цифрових двійників, яка дозволяє здійснювати безперервний моніторинг та прогнозування стану технологічного обладнання. Фундаментальним кроком у стандартизації цього напрямку стало впровадження серії міжнародних стандартів ISO 23247 Digital Twin framework for manufacturing [1], який визначає чотирирівневу архітектуру: рівень спостережуваних виробничих елементів, рівень збору даних та керування пристроями, рівень ядра цифрового двійника та користувацький рівень. Незважаючи на те, що цей стандарт забезпечує надійну базу для створення систем з довільних неоднорідних та розподілених компонентів даних, він залишається переважно інформаційно-орієнтованим набором готових шаблонів. Як зазначає переважна частина дослідників, до прикладу в роботах Huizhong Cao [2] та Shengjian Chen [3], стандарт успішно описує протоколи обміну даними, проте не дає чітких інструкцій щодо того, як інтегрувати фізико-механічні параметри (такі як жорсткість кінематичних ланцюгів, вібраційний вплив або термічний дрейф) у метрологічний контур двійника. У дослідженнях Huizhong Cao [2], присвячених точності верстатів з ЧПК в межах ISO 23247, базовим методом залишається використання матриць однорідних перетворень, де кожна ланка кінематичного ланцюга верстата описується матрицею, що враховує ідеальні переміщення та 6 компонентів похибок (3 лінійні та 3 кутові):

$$T_{actual} = T_{ideal} \cdot \prod_{i=1}^n \delta T_i(q_i),$$

де δT_i - матриця відхилень, що залежить від узагальненої координати q_i . Це дозволяє цифровому двійнику розраховувати об'ємну похибку в будь-якій точці робочого простору.

Критичним аспектом, який також залишається поза увагою більшості розробок, є метрологічна простежуваність цифрових моделей. Maculotti у своїй роботі [4] наголошує на тому, що без оцінки невизначеності результати моделювання цифрового двійника не можуть вважатися юридично значущими для сертифікації якості. Більшість існуючих рішень для цифрових двійників використовують «чисті» дані від сенсорів без урахування їхнього

метрологічного статусу (калібрування, дрейфу нуля тощо). Для забезпечення метрологічної простежуваності Maculotti використовує математичний апарат Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement та методи Монте-Карло. Оскільки в цифровому двійнику дані надходять динамічно, стандартні статичні оцінки замінюються на байєсівські мережі або адаптивні фільтри. Зокрема, для обчислення розширеної невизначеності U в реальному часі застосовується функція щільності ймовірності:

$$U_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i).$$

Цей метод дозволяє двійнику «розуміти», наскільки достовірними є дані з датчиків вібрації чи температури в конкретний момент часу.

Важливим кроком у вирішенні цієї проблеми слід вважати концепцію Digital Metrological Twin - цифрових метрологічних двійників, запропоновану Німецьким національним інститутом метрології. Згідно з дослідженнями Brahim Ahmed Chekh [5], цифрові метрологічні двійники повинні включати не лише геометричну модель верстата, а і динамічний аспект невизначеності, що коригується на основі даних технічної діагностики. Це дозволяє реалізувати механізм «метрологічного підтвердження» безпосередньо в процесі експлуатації машини.

У статті [7] висвітлено роль інтеграції цифрових двійників з технологіями Інтернету речей (IoT) на прикладі Центральної системи метрології (CSM) у Польщі, яка забезпечує збір даних у реальному часі, моніторинг умов вимірювань та підтримку прийняття рішень. В роботі показано, що цифрові двійники вимірювальних систем та об'єктів вимірювань дозволяють підвищити ефективність планування вимірювальних стратегій, зокрема для координатно-вимірювальних машин та оптичних систем, шляхом віртуального моделювання процесів вимірювання. Автори описали підходи до створення геометричних цифрових двійників виробів для контролю якості поверхонь складної форми, а також розробку еталонів із відомою невизначеністю для калібрування засобів вимірювальної техніки. Слід зазначити, що в цій роботі чітко окреслено ключові виклики подальшого розвитку: забезпечення інтероперабельності, стандартизації, точності цифрових двійників та ефективного управління великими обсягами даних, а також зроблено висновок, що цифрові двійники стають невід'ємним інструментом сучасної метрології, сприяючи підвищенню точності, автоматизації та інформаційної цінності вимірювань.

В статті [8] Shamim M. являє собою систематичний огляд, присвячений інтеграції штучного інтелекту в системи прогнозованого технічного обслуговування та моніторингу стану обладнання. Авторами розглянуто застосування методів опорних векторів для автоматизованого виявлення дефектів, класифікації аномалій та прогнозування залишкового ресурсу на основі даних з вібраційних, акустичних, теплових та ультразвукових сенсорів. Shamim M. приділив увагу інтеграції ШІ з промисловим інтернетом речей (IoT), цифровими двійниками та хмарними платформами для створення масштабованих рішень і запропонував теоретичні засади, зокрема теорію надійності та концепцію прогнозування працездатності обладнання. Незважаючи на значні переваги, викликами залишаються, на думку автора, якість даних, інтерпретованість "чорних скриньок" моделей та складність інтеграції.

У роботі [9] Anaya, V., Alberti, E. та ін. детально розглядають концептуальну структуру цифрових двійників в контексті сучасного інтелектуального виробництва. Автори визначають цифровий двійник як динамічну цифрову репліку фізичного активу або процесу, що слугує фундаментальним інструментом для оптимізації прийняття управлінських рішень та підвищення загальної продуктивності промислових систем. Дослідження акцентує увагу на синергії технологій Інтернету речей (IoT), аналітичних платформ та методів машинного навчання, підкреслюючи їхню критичну роль у функціонуванні запропонованого фреймворку. Особлива наукова цінність роботи полягає в аналізі двосторонньої взаємодії цифрових двійників з алгоритмами штучного інтелекту, де імітаційне моделювання виступає

джерелом синтетичних даних для навчання нейронних мереж, дозволяючи нівелювати труднощі, пов'язані з конфіденційністю, складністю маркування та високою вартістю збору реальних експлуатаційних даних. Впровадження описаної архітектури забезпечує можливість предиктивної апробації виробничих альтернатив у безпечному віртуальному середовищі, мінімізуючи операційні витрати та сприяючи системній цифровій трансформації підприємств відповідно до вимог концепції Індустрії 4.0.

3. Метою роботи є розробка науково-методичних засад створення інтегрованого цифрового двійника технологічного обладнання, який базується на синергії методів метрологічного підтвердження та безперервної технічної діагностики через трансформацію статичних інформаційних моделей у динамічні системи шляхом врахування фізико-механічних параметрів у реальному часі.

4. Обговорення результатів досліджень. Концепція цифрових двійників (ЦД) - це динамічне відображення між фізичними об'єктами та симуляційними моделями, що включає фізичний та кібернетичний рівні системи. Ця система сприяє процесам розумного виробництва, забезпечуючи з'єднання, взаємодію, контроль та управління на виробничій ділянці. Однією з виразних переваг цифрових двійників є їхня здатність виявляти системні труднощі в складних системах, які часто спричинені людськими взаємодіями під час операцій. Крім того, впровадження ЦД дозволяє здійснювати кероване даними та розумне виробництво, закладаючи основу для майбутніх технологій Індустрії 4.0. Отже, концептуальне впровадження Індустрії 4.0 зумовило інтенсивну еволюцію технології цифрових двійників, що на сучасному етапі формує базис для переходу до стратегії Індустрії 5.0. Ключовими векторами цього розвитку є антропоцентризм, системна резильєнтність та екологічна сталість. Впровадження технологій цифрових двійників у виробничі цикли забезпечує високий рівень конвергенції між фізичними та кібернетичними системами, що дозволяє оптимізувати ефективність інтегрованих мереж у реальному часі. Проте актуальними науково-практичними викликами залишаються питання підвищення екологічної ефективності та поглибленої інтеграції цифрових двійників з архітектурами штучного інтелекту (AI) та віртуальної реальності (VR).

Функціональна роль цифрових двійників як віртуальних дериватів фізичних активів трансформувалася: від інструментів моніторингу та предиктивного обслуговування до засобів комплексної інтеграції кіберфізичних просторів. Відповідно до положень Європейської Комісії щодо розвитку Індустрії 5.0, спостерігається синергія цифрових двійників із технологіями розширеної реальності (XR) та інтелектуальними системами моніторингу сталого розвитку. Застосування імерсивних інтерфейсів у поєднанні з аналітичними моделями AI дозволяє реалізувати інтуїтивну взаємодію з цифровими аналогами, детермінуючи пріоритет людських цінностей у процесі прийняття рішень. Зокрема, використання цифрового моделювання людини у середовищі цифрових двійників уможливило проведення предиктивного ергономічного аналізу. Це сприяє верифікації робочих процесів, мінімізації фізичного та когнітивного навантаження на персонал шляхом симуляції та оптимізації кінематики рухів і поведінкових патернів працівників.

Для дослідження впливу нестационарних чинників на метрологічну надійність та якість продукції потрібно провести аналіз вібраційного фону та динамічної стабільності системи. Аналіз вібраційного фону та динамічної стабільності технологічної системи в контексті розробки цифрових двійників є фундаментальним аспектом забезпечення метрологічної надійності. У сучасній механічній інженерії вібрації розглядаються не просто як небажаний побічний ефект обробки, а як складний стохастичний процес, що безпосередньо модулює траєкторію формоутворення. На відміну від термічних деформацій, які мають яскраво виражену часову інерційність, вібраційні коливання спричиняють високочастотні зміщення виконавчих органів, що призводить до виникнення мікрогеометричних похибок, які неможливо скомпенсувати стандартними статичними корекціями системи.

Вібраційний фон будь-якого обладнання складається з вимушених коливань та автоколивань. Основні внутрішні джерела вимушених коливань - це дисбаланс, наприклад, шпинделя та робочого інструменту. При залишковому дисбалансі класу G2,5 (згідно з ISO 1940) на частотах обертання понад 1000 хв⁻¹ амплітуда вібраційного зміщення може сягати 3-5 мкм, що критично для прецизійної обробки. Окрім дисбалансу, суттєвий внесок у вібраційний спектр вносять похибки кроку та пульсації моментів у серводвигунах, що генерують вібрації в діапазоні 50-400 Гц.

Зовнішні вібрації, що передаються через фундамент від іншого обладнання, зазвичай мають низьку частоту (10-50 Гц) та амплітуду до 1-2 мкм. Проте вони можуть входити в резонанс із власними частотами станини, що призводить до зростання амплітуди коливань на виконавчих органах у 3-5 разів.

Особливу небезпеку для метрологічного підтвердження становлять зовнішні вібрації, що передаються через цехову підлогу. Хоча їх амплітуда зазвичай не перевищує 1-1,5 мкм, вони характеризуються низькою частотою, яка часто збігається з власними частотами коливань станини верстата (10-35 Гц). Виникнення резонансних явищ у такій системі призводить до неконтрольованого зростання амплітуди коливань на виконавчих органах у декілька разів, що спричиняє хвилястість поверхні та порушення допусків на площинність і циліндричність. Для цифрового двійника це означає необхідність безперервного моніторингу віброшвидкості v_{rms} та спектральної густини потужності для ідентифікації зон нестабільності.

Статистичні дані свідчать про пряму кореляцію між інтегральним рівнем вібрації та якісними показниками продукції. При підвищенні віброшвидкості понад еталонні значення спостерігається нелінійне зростання параметрів шорсткості Ra та Rz. До прикладу, при нормальному рівні вібрацій (віброшвидкість $v_{rms} < 1,1$ мм/с) шорсткість становить Ra 0,4-0,8 мкм. При зростанні вібрацій до рівня $v_{rms} = 4.5$ мм/с шорсткість збільшується до Ra 2,5-3,2 мкм. Так само вібрації з низькою частотою спричиняють хвилястість поверхні з кроком, рівним подачі на оберт, а амплітуда хвилястості може становити до 30–50% від загального допуску на розмір. Нижче наведено статистичну залежність параметрів якості від вібраційного стану обладнання, отриману в ході серії експериментальних досліджень.

Таблиця 1. Вплив рівня вібрації на параметри мікрогеометрії поверхні (сталь 40X)

Table 1. Influence of vibration level on surface microgeometry parameters (steel 40X)

Стан технологічної системи	Рівень вібрації v_{rms} , мм/с	Середня шорсткість Ra, мкм	Висота нерівностей Rz, мкм	Похибка розміру, мкм
Еталонний (прецизійний)	0,5 - 1,1	0,35 - 0,50	1,8 - 2,5	± 2,0
Допустимий робочий	1,2 - 2,8	0,80 - 1,25	4,5 - 6,2	± 7,5
Критичний (граничний)	2,9 - 4,5	1,60 - 2,50	8,5 - 12,0	± 18,0
Аварійний (резонанс)	> 4,5	> 4,50	> 22,0	> 45,0

Для інтеграції в цифровий двійник можна використати передавальну функцію, яка дозволяє в реальному часі розраховувати динамічну похибку:

$$\delta_{dyn}(t) = \int_0^{\infty} F(t - \tau) \cdot g(\tau) d\tau,$$

де $F(t)$ - миттєве значення сили різання, а $g(\tau)$ - імпульсна перехідна характеристика системи.

Динамічна жорсткість системи k_{dyn} є ключовим показником. Для сучасного обладнання вона становить приблизно 50-120 Н/мкм. При виникненні регенеративних автоколивань змушувальні сили можуть змінюватися з частотою, близькою до власної

частоти (1-3 кГц), що призводить до різкого погіршення таких показників, як шорсткість чи форма поверхонь оброблюваних деталей.

Динамічна жорсткість системи k_{dyn} визначає здатність верстата чинити опір виникненню автоколивань. При зниженні жорсткості через знос напрямних ковзання або ослаблення натягу в підшипниках шпинделя, амплітуда коливань зростає пропорційно зменшенню коефіцієнта демпфування. Це створює додаткову невизначеність у метрологічній моделі цифрового двійника. Статистичний розподіл часток різних джерел вібрацій у загальному бюджеті похибки наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Розподіл впливу джерел вібрацій на сумарну похибку обробки

Table 2. Distribution of the influence of vibration sources on the total processing error

Джерело вібраційного збурення	Діапазон частот (Гц)	Вплив на похибку (%)	Основний наслідок для якості
Дисбаланс	100 – 1500	45%	Радіальне биття, шорсткість
Автоколивання	800 – 4000	25%	Хвилястість, мікросколи інструменту
Похибки приводів	50 – 300	15%	Гранність, похибка кроку
Зовнішні завади (через фундамент)	5 – 50	10%	Порушення геометричної точності
Інші	10 – 200	5%	Випадкові викиди точності

Інтеграція цих даних у концепцію цифрового двійника дозволяє реалізувати механізм "динамічного метрологічного підтвердження". Використовуючи алгоритми швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-аналізу, система технічної діагностики в режимі реального часу визначає залишковий ресурс механічних вузлів та прогнозує момент виходу параметрів точності за межі поля допуску. Таким чином, вібраційний моніторинг стає невід'ємною частиною сертифікації якості процесу обробки, дозволяючи перейти від пасивного контролю готової продукції до активного керування точністю в закритому циклі.

5. Висновки. За результатами проведеного дослідження щодо інтеграції метрологічного підтвердження та технічної діагностики в концепцію цифрових двійників можна зробити такі висновки:

- доведено, що сучасна концепція цифрових двійників повинна виходити за межі суто інформаційного обміну (згідно зі стандартом ISO 23247) і включати динамічні аспекти метрологічної простежуваності та фізичної природи відмов;
- підтверджено пряму кореляцію між рівнем вібраційного фону та параметрами мікрогеометрії поверхні;
- запропоновано використання передавальних функцій для розрахунку динамічної похибки $\delta_{dyn}(t)$ у реальному часі, що дозволяє реалізувати механізм «динамічного метрологічного підтвердження» та забезпечує активне керування точністю в закритому циклі.

впровадження розробленого підходу дозволяє перейти від регламентного обслуговування до предиктивного сервісу за фактичним технічним станом вузлів, що підвищує ресурс обладнання та гарантує вихідну якість продукції в умовах інтелектуального виробництва Industry 4.0.

Список використаних джерел:

1. ISO 23247-2. Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles. 2021-10. ISO/TC 184/SC 4.
2. Cao, H., Söderlund, H., Fang, Q., Chen, S., Erdal, L., Gubartalla, A., & Johansson, B. (2025). Towards AI-based Sustainable and XR-based human-centric manufacturing: Implementation of ISO 23247 for digital twins of production systems. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.14580>.
3. Chen, S., Ellwein, C., Klingel, L., Neumann, R., Zhang, J., Riedel, O., Wortmann, A. (2025). Digital twins for machine tools: a systematic mapping study. *Digital Twin*, 2(4). <https://doi.org/10.1080/27525783.2025.2538727>.
4. Maculotti, Giacomo. (2023). Towards traceable and trustworthy Digital Twins for quality control. ENBIS 2023 Conference Valencia 10-14 Settembre 2023.
5. Brahim Ahmed Chekh. (2025). Digital twin of robotic 3D scanning system: Providing metrological traceability. 2nd International Workshop on Metrology for Virtual Measuring Instruments (VirtMet2025).
6. Poniatowska M., Mazurkiewicz D., Sobiecki P. (2024). Digital Twin in Metrology: Opportunities, Current Implementations and Research Challenges. *Metrology & Hallmark*. 2024. No. 6. P. 1-13.
7. Bartłomiej Krawczyk, Piotr Szablewski, Bartosz Gapinski, Michał Wieczorowski, Rehan Khan. (2024). On-machine measurement as a factor affecting the sustainability of the machining process. *Sustainability*. 2024, 16, 2093. <https://doi.org/10.3390/su16052093>.

References:

1. 1. ISO 23247-2. Automation systems and integration - Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles. 2021-10. ISO/TC 184/SC 4.
2. Cao, H., Söderlund, H., Fang, Q., Chen, S., Erdal, L., Gubartalla, A., & Johansson, B. (2025). Towards AI-based Sustainable and XR-based human-centric manufacturing: Implementation of ISO 23247 for digital twins of production systems. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2508.14580>.
3. Chen, S., Ellwein, C., Klingel, L., Neumann, R., Zhang, J., Riedel, O., Wortmann, A. (2025). Digital twins for machine tools: a systematic mapping study. *Digital Twin*, 2(4). <https://doi.org/10.1080/27525783.2025.2538727>.
4. Maculotti, Giacomo. (2023). Towards traceable and trustworthy Digital Twins for quality control. ENBIS 2023 Conference Valencia 10-14 Settembre 2023.
5. Brahim Ahmed Chekh. (2025). Digital twin of robotic 3D scanning system: Providing metrological traceability. 2nd International Workshop on Metrology for Virtual Measuring Instruments (VirtMet2025).
6. Poniatowska M., Mazurkiewicz D., Sobiecki P. (2024). Digital Twin in Metrology: Opportunities, Current Implementations and Research Challenges. *Metrology & Hallmark*. 2024. No. 6. P. 1-13.
7. Bartłomiej Krawczyk, Piotr Szablewski, Bartosz Gapinski, Michał Wieczorowski, Rehan Khan. (2024). On-machine measurement as a factor affecting the sustainability of the machining process. *Sustainability*. 2024, 16, 2093. <https://doi.org/10.3390/su16052093>.
8. Folea M. (2025). ISO GPS Changes-challenges for manufacturing industry. The 17th International Conference "STANDARDIZATION, PROTOTYPES AND QUALITY: A means of Balkan Countries' collaboration". 2025. P. 348-353. <https://doi.org/10.31926/RECENT.2025.77.348>.

УДК 621.867.52

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0609>**¹Олександр Панфілов,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2917-0328>, e-mail: panfilov6418@gmail.com**¹Микола Нестеренко,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4073-1233>, e-mail : nesterenkonikola@gmail.com¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
просп. Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна

АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОГО ДОУЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗІНЕРЦІЙНОГО ПРИВАНТАЖУВАЧА

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто динамічні особливості роботи вібраційної установки з безінерційним імпульсним привантажувачем та автономним віброзбуджувачем, призначеної для доущільнення бетонних сумішей. Запропоновано узагальнену математичну модель коливального процесу, яка враховує гармонічно-імпульсний характер збудження, нелінійні пружно-дисипативні властивості бетонної суміші та хвильові процеси поширення напружень у шарі матеріалу. На основі еквівалентної лінеаризації отримано амплітудно-залежні характеристики системи та проаналізовано умови реалізації квазірезонансного імпульсно-вібраційного режиму. Обґрунтовано вплив фазової синхронізації імпульсних навантажень, параметрів привантажувача та частот збудження на формування вищих гармонік і пікових динамічних напружень, ефективних для доущільнення верхніх шарів бетонної суміші. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації вібраційного обладнання для формування бетонних і залізобетонних виробів з підвищеними вимогами до якості та енергоефективності технологічного процесу.

Ключові слова: вібраційна установка, імпульсний привантажувач, доущільнення бетонних сумішей, нелінійні коливання, імпульсно-вібраційний режим, хвильові процеси, енергоефективність.

ANALYTICAL SUBSTITUTION OF IMPULSE-VIBRATION COMPACTION OF CONCRETE MIXTURES USING AN INERTIAL-FREE LOADER

ABSTRACT. The article examines the dynamic features of a vibration installation with a non-inertial impulse surcharge and an autonomous vibration exciter intended for the additional compaction of concrete mixtures. A generalized mathematical model of the oscillatory process is proposed, which takes into account the harmonic–impulse nature of excitation, the nonlinear elastic–dissipative properties of the concrete mixture, and wave processes of stress propagation within the material layer. Based on the method of equivalent linearization, amplitude-dependent characteristics of the system are obtained and the conditions for the implementation of a quasi-resonant impulse–vibration regime are analyzed. The influence of phase synchronization of impulse loads, surcharge parameters, and excitation frequencies on the formation of higher harmonics and peak dynamic stresses effective for the additional compaction of the upper layers of the concrete mixture is substantiated. The obtained results can be used in the design and modernization of vibration equipment for manufacturing concrete and reinforced concrete products with increased requirements for quality and energy efficiency of the technological process.

Keywords: vibration installation, impulse surcharge, additional compaction of concrete mixtures, nonlinear oscillations, impulse–vibration regime, wave processes, energy efficiency.

1. Постановка проблеми. Вібраційні установки широко застосовуються в будівельній індустрії для ущільнення бетонних сумішей, при цьому якість ущільнення безпосередньо визначає щільність, однорідність структури та довговічність готових виробів. Традиційні гармонічні режими віброущільнення не завжди забезпечують достатню інтенсивність впливу, особливо для жорстких, малорухомих і легких бетонів, а також при формуванні виробів значної товщини. Перспективним напрямом підвищення ефективності процесу є

застосування імпульсних і комбінованих вібраційно-імпульсних режимів, які сприяють формуванню хвильових процесів у бетонному середовищі та інтенсифікації внутрішніх переміщень частинок суміші. Однак реалізація таких режимів у традиційних конструкціях супроводжується істотним зростанням інерційних навантажень, що призводить до підвищених динамічних напружень, збільшення енерговитрат і зниження ресурсу обладнання. Застосування безінерційних привантажувачів з автономними віброзбуджувачами дозволяє формувати локалізовані імпульсні навантаження без значного збільшення коливної маси системи, однак потребує теоретичного обґрунтування їх параметрів з урахуванням нелінійних і хвильових ефектів. У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення динамічної моделі та визначення раціональних параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для підвищення ефективності доущільнення бетонних сумішей.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Проблема ефективного ущільнення бетонних сумішей є однією з ключових у технології виробництва бетонних і залізобетонних виробів, оскільки саме характер прикладених динамічних навантажень визначає інтенсивність перебудови внутрішньої структури суміші, її ущільнюваність, рівномірність розподілу компонентів та кінцеві фізико-механічні властивості матеріалу. У зв'язку з цим значна кількість досліджень присвячена аналізу взаємодії робочих органів вібраційних машин з бетонною сумішшю, розробленню нових конструктивних схем віброплощадок та оптимізації параметрів коливального процесу [1–3, 6, 8].

У роботах [1, 3, 8] детально досліджено фізичні механізми вібраційного ущільнення бетонних сумішей з урахуванням динамічного тиску, інерційних і хвильових ефектів. Показано, що під дією вертикальних і комбінованих коливань у бетонному середовищі формуються зони підвищеного напружено-деформованого стану, які сприяють активному переміщенню частинок заповнювача, руйнуванню структурних містків та інтенсифікації процесів перекомпонування зернового каркаса. Встановлено, що максимальна ефективність ущільнення досягається за умов формування несталих режимів коливань із наявністю вищих гармонік та імпульсних складових, які забезпечують короткочасні пікові прискорення значної величини.

Дослідження динаміки вібраційних систем та їх взаємодії з бетонною сумішшю, виконані у працях [2, 3, 5], показали, що традиційні гармонічні режими вібраційного збудження не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал ущільнення, особливо при роботі з жорсткими та малорухомими сумішами. Автори відзначають, що істотне підвищення ефективності можливе за рахунок застосування імпульсних та імпульсно-резонансних режимів, які створюють складне спектральне наповнення коливального процесу та забезпечують формування хвильових фронтів тиску у товщі бетонного шару. При цьому встановлено, що динамічний тиск на суміш значною мірою залежить не лише від амплітуди коливань, а й від тривалості імпульсів, їх частоти та фазового зсуву між окремими складовими збудження.

У роботах [4, 6] наведено огляд сучасних конструктивних схем віброплощадок з вертикальними коливаннями та проаналізовано можливості керування параметрами ущільнення шляхом зміни частоти, амплітуди та характеру коливального збудження. Показано, що застосування комбінованих схем із декількома джерелами коливань дозволяє розширити амплітудно-частотний діапазон та формувати складні режими руху робочого органу, однак супроводжується ускладненням конструкції, зростанням інерційних навантажень та підвищенням енергоємності процесу. При цьому проблема локального доущільнення верхніх шарів бетонної суміші залишається недостатньо вирішеною, що обмежує ефективність формування виробів значної товщини.

Важливий внесок у розвиток теорії імпульсно-вібраційного ущільнення зроблено у працях [5, 9], де розглянуто конструктивні рішення імпульсних вібраційних установок та експериментально досліджено їх вплив на процес формування бетонних виробів. Встановлено, що імпульсні режими збудження дозволяють істотно знизити тривалість

ущільнення, підвищити однорідність структури та зменшити енерговитрати порівняно з класичними гармонічними режимами. Разом із тим автори відзначають, що ефективність таких систем значною мірою залежить від правильного вибору масо-інерційних, жорсткісних і часових параметрів імпульсного впливу, що потребує подальшого теоретичного обґрунтування.

У працях [7] розглянуто підходи до математичного моделювання середовища, яке обробляється вібраційними пристроями, з урахуванням нелінійних реологічних характеристик, в'язкопружних властивостей та дисипативних втрат енергії. Показано, що бетонну суміш доцільно розглядати як багатофазне середовище зі змінними параметрами жорсткості та демпфування, які залежать від ступеня ущільнення та режиму навантаження. Це суттєво ускладнює побудову аналітичних моделей та потребує застосування узагальнених методів динамічного аналізу, зокрема спектрального підходу та лінеаризації нелінійних залежностей.

Аналіз наведених публікацій свідчить, що значний науковий інтерес зосереджений на дослідженні імпульсних та комбінованих режимів ущільнення, а також на розробленні відповідних конструктивних схем вібраційного обладнання. Водночас більшість існуючих робіт орієнтована на системи з підвищеними інерційними масами та жорстко зв'язаними віброзбуджувачами, що обмежує можливості керування локальними процесами ущільнення і призводить до значних динамічних навантажень на елементи конструкції. Недостатньо дослідженим залишається напрям застосування безінерційних привантажувачів з автономними віброзбуджувачами, які дозволяють формувати локалізовані імпульсні навантаження без істотного збільшення коливної маси системи.

3. Мета і завдання дослідження. Метою статті є обґрунтування та оптимізація параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для доущільнення бетонних сумішей на основі динамічного та хвильового аналізу взаємодії елементів системи «вібраційна установка – привантажувач – бетонна суміш» з метою підвищення ефективності ущільнення, енергоефективності процесу та стабільності роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети у роботі розглянуто фізичну та розрахункову моделі вібраційної установки з імпульсним привантажувачем, проаналізовано особливості формування хвильово-імпульсних режимів ущільнення та їх вплив на динамічні характеристики системи.

Завданнями дослідження є розроблення узагальненої математичної моделі коливального процесу системи «вібраційна установка – бетонна суміш – безінерційний привантажувач» з урахуванням нелінійних пружно-дисипативних властивостей середовища та імпульсного характеру збудження, формування методики визначення приведених масо-інерційних і жорсткісних параметрів, аналіз впливу частоти, амплітуди та тривалості імпульсів на спектр коливань і хвильові процеси в бетонній суміші, а також обґрунтування раціональних параметрів автономного віброзбуджувача та привантажувача з метою забезпечення інтенсивного й рівномірного доущільнення бетонних сумішей.

4. Фізична та розрахункова модель вібраційної установки з імпульсним привантажувачем

Запропонована вібраційна установка з імпульсним привантажувачем призначена для реалізації комбінованого вібраційно-імпульсного режиму ущільнення бетонних сумішей, що забезпечує інтенсифікацію процесу формування та підвищення однорідності структури матеріалу. Конструктивна схема установки наведена на рисунку 1 і включає нерухому раму 1, пружні опори 2, рухому раму 3, форму з бетонною сумішшю 4, безінерційний привантажувач 5, імпульсний механізм 6 та автономний віброзбуджувач 7. Для математичного опису коливального процесу систему доцільно подати у вигляді багатомасової моделі з узагальненими координатами, які характеризують вертикальні переміщення рухомої рами та привантажувача.

Рухома рама 3 разом із формою 4 та бетонною сумішшю здійснює коливальний рух

відносно нерухокої рами 1 на пружних опорах 2, які формують необхідні пружно-дисипативні характеристики системи та забезпечують її віброізоляцію. Безінерційний привантажувач 5 розміщується над поверхнею бетонної суміші та взаємодіє з нею через контактну поверхню, формуючи додаткове локальне динамічне навантаження. Імпульсний механізм 6 генерує періодичні силові імпульси, які передаються на привантажувач, забезпечуючи короткочасні навантаження високої інтенсивності.

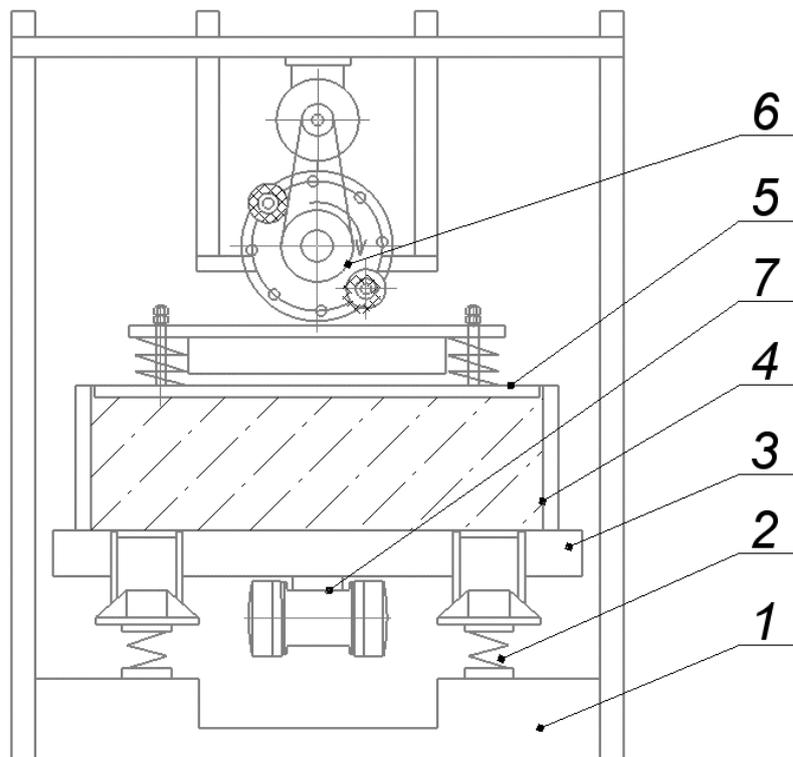


Рис. 1. Схема вібраційної установки з імпульсним привантажувачем для ущільнення бетону: 1 – рама, 2 – опори, 3 – рухома рама, 4 – форма з бетоном, 5 – привантажувач, 6 – імпульсний механізм, 7 – віброзбуджувач

Fig. 1. Scheme of a vibration installation with an impulse loader for compacting concrete: 1 – frame, 2 – supports, 3 – movable frame, 4 – form with concrete, 5 – loader, 6 – impulse mechanism, 7 – vibrator

Принцип дії установки полягає у поєднанні гармонічних коливань рухокої рами з імпульсними впливами автономного віброзбуджувача, що створює складний коливальний процес із багатоспектральним наповненням. У результаті в бетонній суміші формуються хвильові процеси стиску та розвантаження, які поширюються по висоті шару, інтенсифікуючи внутрішні переміщення частинок заповнювача, зменшуючи міжзернове тертя та сприяючи більш щільному пакуванню структурних елементів.

На відміну від традиційних схем, у яких імпульсне навантаження реалізується шляхом збудження всієї масивної системи, застосування безінерційного привантажувача дозволяє сформувати локалізований імпульсний вплив без істотного збільшення коливної маси. Це забезпечує досягнення високих пікових прискорень у зоні контакту з бетонною сумішшю за відносно малих енерговитрат і знижених динамічних навантажень на несучі елементи конструкції.

З точки зору динаміки, систему «рухома рама – форма – бетонна суміш – привантажувач» доцільно розглядати як багатомасову коливальну систему з нелінійними пружно-дисипативними зв'язками та комбінованим гармонічно-імпульсним збудженням. Бетонна суміш при цьому моделюється як реологічно складне середовище зі змінними параметрами жорсткості та демпфування, що залежать від ступеня ущільнення, вологості, гранулометричного складу та режиму навантаження.

Імпульсний вплив, який створюється механізмом 6, призводить до формування короткочасних хвиль напружень у бетонному середовищі, що поширюються від поверхні контакту вглиб шару. Внаслідок відбиття хвиль від дна форми та меж розділу середовищ виникає інтерференція прямої та відбитої хвиль, що сприяє утворенню локальних зон підвищеного динамічного тиску. Саме ці зони відіграють визначальну роль у процесі доущільнення, особливо у верхніх і приповерхневих шарах бетонної суміші, де ефективність класичного гармонічного віброущільнення є обмеженою.

Як основну узагальнену координату приймемо вертикальне переміщення рухомої рами з формою та бетонною сумішшю $z(t)$, а також відносне переміщення привантажувача $y(t)$ відносно поверхні бетонної суміші. Рухома частина системи характеризується приведеною масою:

$$m_{\Sigma} = m_3 + m_4 + m_b \quad (1)$$

де m_3 – маса рухомої рами, m_4 – маса форми, m_b – приведена маса бетонної суміші, що залучається до коливального процесу.

Пружні опори 2 характеризуються еквівалентною жорсткістю c та коефіцієнтом демпфування b , що визначають пружно-дисипативні властивості системи. Вібробуджувач 7 створює гармонічну збуджуючу силу $F_v(t) = F_0 \sin(\omega t)$.

Імпульсний механізм 6 формує періодичну послідовність короткочасних імпульсів, що передаються через безінерційний привантажувач 5 у бетонну суміш. Цей вплив можна подати у вигляді імпульсної сили:

$$F_i(t) = \sum_{k=1}^N P_k \delta(t - t_k), \quad (2)$$

де P_k – імпульс сили, $\delta(t)$ – дельта-функція Дірака, t_k – моменти прикладання імпульсів.

З урахуванням зазначених сил рівняння руху системи в узагальнених координатах набуває вигляду:

$$m_{\Sigma} \ddot{z}(t) + b \dot{z}(t) + cz(t) = F_v(t) + F_i(t) + R(z, \dot{z}), \quad (3)$$

де $R(z, \dot{z})$ – нелінійна реакція бетонної суміші, яка враховує змінну жорсткість і дисипативні властивості ущільнюваного середовища.

Для опису механічної поведінки бетонної суміші використовується узагальнена нелінійна модель пружно-в'язкого середовища, в якій реакція представлена у вигляді:

$$R(z) = k_1 z + k_3 z^3, \quad (4)$$

де k_1 – лінійна складова жорсткості, k_3 – коефіцієнт нелінійної жорсткості, що відображає ущільнювальні властивості бетонної суміші.

Застосовуючи метод еквівалентної лінеаризації, нелінійну характеристику замінюємо еквівалентною лінійною жорсткістю

$$k_{eq}(A) = k_1 + \frac{4}{3} k_3 A^2 \quad (5)$$

де A – амплітуда коливань рухомої рами.

Тоді узагальнене рівняння руху набуває вигляду

$$m_{\Sigma} \ddot{z}(t) + b \dot{z}(t) + (c + k_{eq})z(t) = F_0 \sin(\omega t) + \sum_{k=1}^N P_k \delta(t - t_k) \quad (6)$$

Для аналізу хвильових процесів у бетонній суміші доцільно використати одномірну хвильову модель поширення імпульсних напружень уздовж координати x , перпендикулярної до поверхні ущільнення:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = c_w^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \eta \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \quad (7)$$

де $u(x, t)$ – переміщення частинок бетонної суміші, c_w – швидкість поширення хвиль у

середовищі, η – коефіцієнт внутрішнього демпфування.

Імпульсний вплив привантажувача задає граничні умови у вигляді короткочасного тиску на поверхні бетонної суміші

$$\sigma(0, t) = \frac{F_i(t)}{S} \quad (8)$$

де S – площа контакту привантажувача з поверхнею бетону.

Накладання гармонічного збудження від вібробуджувача 7 та імпульсного впливу механізму 6 призводить до формування складного коливального процесу, що містить основну гармоніку з частотою ω , а також спектр вищих гармонік, кратних частоті імпульсів. Це зумовлює появу короткочасних піків прискорень, які істотно перевищують значення, характерні для класичних гармонічних режимів, і сприяє інтенсифікації процесів доущільнення.

Узагальнене рівняння руху системи можна записати як вертикальні коливання рухомої частини вібраційної установки, що включає рухому раму, форму та приведену масу бетонної суміші. Динамічний стан системи описується узагальненою координатою $z(t)$. Бетонну суміш моделюємо як пружно-в'язке середовище з жорсткісною нелінійністю третього порядку, що є типовим припущенням для задач вібраційного ущільнення.

Рівняння руху має вигляд:

$$m_\Sigma \ddot{z}(t) + b\dot{z}(t) + cz(t) + k_1 z(t) + k_3 z^3(t) = F_0 \sin(\omega t) + \sum_{k=1}^N P_k \delta(t - t_k) \quad (9)$$

де m_Σ – приведена маса коливальної системи; b – коефіцієнт в'язкого демпфування; c – жорсткість пружних опор; k_1, k_3 – лінійна та нелінійна складові жорсткості бетонної суміші; F_0, ω – амплітуда та кругова частота гармонічного збудження; P_k – імпульси сили, прикладені в моменти часу t_k .

Об'єднуючи лінійні складові жорсткості, отримаємо:

$$m_\Sigma \ddot{z} + b\dot{z} + c_\Sigma z + k_3 z^3 = F_0 \sin(\omega t) + \sum_{k=1}^N P_k \delta(t - t_k), \quad c_\Sigma = c + k_1 \quad (10)$$

У режимі усталених квазігармонічних коливань $z(t) \approx A \sin(\omega t)$ кубічна нелінійність замінюється еквівалентною лінійною жорсткістю за методом першої гармоніки:

$$k_3 z^3 \Rightarrow \frac{4}{3} k_3 A^2 z \quad (11)$$

Тоді ефективна жорсткість системи дорівнює

$$c_{\text{eff}}(A) = c_\Sigma + \frac{4}{3} k_3 A^2 \quad (12)$$

а амплітудно-залежна власна кругова частота:

$$\omega_0(A) = \sqrt{\frac{c_{\text{eff}}(A)}{m_\Sigma}} = \sqrt{\frac{c_\Sigma + \frac{4}{3} k_3 A^2}{m_\Sigma}} \quad (13)$$

Таким чином, система є слабко нелінійною з жорсткісною нелінійністю, що зумовлює зміщення резонансної частоти зі зростанням амплітуди.

Для ефективного підсилення гармонічних коливань частота збудження повинна задовольняти умову $|\omega - \omega_0(A)| \leq \Delta\omega$ де ширина резонансної області визначається рівнем демпфування:

$$\Delta\omega \approx \frac{b}{2m_\Sigma} \quad (14)$$

Імпульсний механізм забезпечує додатковий приплив енергії у систему. Приріст механічної енергії від одного імпульсу дорівнює

$$\Delta E_k = P_k \dot{z}(t_k) \quad (15)$$

Максимальний енергетичний ефект реалізується за умови прикладання імпульсів у моменти максимального значення швидкості:

$$\dot{z}(t_k) = \dot{z}_{max} \quad (16)$$

що відповідає фазовій умові $\omega t_k = 2\pi + 2\pi n$, $n \in \mathbb{Z}$

Безінерційний привантажувач маси m_p розглядається як локальне джерело імпульсного навантаження та не входить до складу приведеної маси m_Σ .

Імпульс сили, що передається бетонній суміші, визначається з рівняння балансу імпульсу:

$$P_k = \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} F_c(t) dt = m_p(v^- - v^+) \quad (17)$$

де v^- , v^+ – швидкості привантажувача безпосередньо до та після контакту.

Максимальний контактний тиск оцінюється як

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S} \approx \frac{P_k}{S \Delta t} \quad (18)$$

де S – площа контакту; Δt – тривалість імпульсної взаємодії.

Поширення імпульсного навантаження в бетонній суміші описується одномірним хвильовим рівнянням з демпфуванням:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + 2\zeta \omega_w \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = c_w^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \quad (19)$$

де $u(x,t)$ – вертикальні переміщення частинок суміші; c_w – швидкість поширення хвиль у бетонному середовищі; ζ – коефіцієнт внутрішнього демпфування; ω_w – характерна частота хвильового процесу.

Гранична умова на поверхні контакту має вигляд:

$$E \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0} = \sigma(t) = \frac{F_i(t)}{S} \quad (20)$$

Для імпульсного збудження з круговою частотою ω_i довжина хвилі дорівнює

$$\lambda = \frac{2\pi c_w}{\omega_i} \quad (21)$$

Максимальна інтенсивність ущільнення реалізується за умови формування стоячих хвиль стиску в бетонному шарі товщиною h :

$$h = \frac{4}{2k+1} \lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

Для оцінювання ефективності процесу імпульсно-вібраційного доущільнення доцільно використовувати безрозмірний параметр

$$П = \frac{\sigma_{max}}{\rho g h} \quad (23)$$

де ρ – густина бетонної суміші, g – прискорення вільного падіння.

Значення $П > 1$ відповідає режиму інтенсивного доущільнення, за якого динамічні напруження перевищують статичний тиск власної ваги бетонного шару.

5. Висновки

У роботі розроблено та теоретично обґрунтовано динамічну модель вібраційної установки з безінерційним імпульсним привантажувачем, яка враховує гармонічно-імпульсний характер збудження, нелінійні пружно-дисипативні властивості бетонної суміші та хвильові процеси поширення напружень у шарі матеріалу. Показано, що застосування еквівалентної лінеаризації дозволяє коректно описати амплітудну залежність власної частоти системи та умови реалізації квазірезонансного режиму роботи. Встановлено, що фазово

узгоджене прикладання імпульсних навантажень у моменти максимальних швидкостей коливального руху забезпечує істотне зростання миттєвих прискорень і динамічного тиску на бетонну суміш без значного збільшення інерційних навантажень на конструкцію. Обґрунтовано умови хвильового підсилення процесу доущільнення, за яких формування стоячих хвиль стиску в бетонному шарі сприяє підвищенню рівномірності та інтенсивності ущільнення по його висоті. Отримані результати створюють наукову основу для раціонального вибору параметрів безінерційного привантажувача та автономного вібробуджувача і можуть бути використані при проектуванні та модернізації вібраційного обладнання для формування бетонних виробів.

Список використаних джерел:

1. Нестеренко, М., & Ведмідь, В. (2025). Теоретичні положення та аналіз робочого процесу ущільнення бетонних сумішей. *Техніка будівництва*, (42), 4–13. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0501> <http://tehbud.knuba.edu.ua/article/view/331978/320980>
2. Maslov A.G., Salenko J.S., Maslova N.A. Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture // *Вісник КНУ імені Михайла Остроградського*. – 2011. – Вип. 2 (67). – С. 93–98.
3. Nesterenko M.P. Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture / M.P. Nesterenko, A.G. Maslov, Ju.S. Salenko // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7, № 3.2. – P. 260-264.
4. Дьяченко О., Пригоцький В., Маліцький І. Огляд схем вібромайданчиків з вертикальними коливаннями та аналіз можливостей керування параметрами ущільнення // *Енергоощадні машини і технології : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 17–19 трав. 2022 р.)*. – Київ : КНУБА, 2022. – С. 28–31.
5. Маслов О.Г. Дослідження вібраційного органу для ущільнення бетонних сумішей з віброімпульсними коливаннями / О. Г. Маслов, Ю. С. Саленко, І. І. Жовтяк, Р. А. Вакулєнко, В. Л. Дятловська // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2020. – Вип. 5-6. – С. 139-146. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2020_5-6_21
6. Назаренко І. Огляд і аналіз вібраційного обладнання для формування плоских залізобетонних виробів / І. Назаренко, О. Дедов, О. Дьяченко, А. Свідерський // *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. – 2017. – Вип. 90. – С. 49–58.
7. Сердюк Л.І., Давиденко Ю.О., Костенко П.М. Деякі підходи до моделювання середовища, що обробляється вібраційним пристроєм // *Ресурсоекономні матер., констр., будівлі та споруди*. – Рівне : НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 69–72.
8. Nesterenko M. M., Vedmid V. V. Дослідження впливу вертикальних вібраційних режимів на взаємодію робочого органу віброплощинки з бетонною сумішшю. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2025. No. 2. P. 182-188. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.23>
9. Ведмідь В.В. Експериментальні дослідження комбінованої імпульсно-вібраційної установки / В.В. Ведмідь, Т.М. Нестеренко, М.М. Нестеренко, М.О. Пирлик // *Системні технології*. – 2025. – Т. 5, № 160. – С. 178–188. – URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19> . <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/2237>

References:

1. Nesterenko, M., & Vedmid, V. (2025). Teoretychni polozhennia ta analiz robochoho protsesu ushchilnennia betonnykh sumishei [Theoretical principles and analysis of the working process of concrete mixtures compaction]. *Tekhnika budivnytstva – Construction Engineering*, (42), 4–13. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0501>
2. Maslov, A. G., Salenko, J. S., & Maslova, N. A. (2011). Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2(67), 93–98.
3. Nesterenko, M. P., Maslov, A. G., & Salenko, J. S. (2018). Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture. *International Journal of Engineering & Technology*,

- 7(3.2), 260–264.
4. Diachenko, O., Pryhotskyi, V., & Malitskyi, I. (2022). Ohliad skhem vibromaidanchykyv z vertykalnymy kolyvanniamy ta analiz mozhlyvostei keruvannya parametry ushchilnennia [Review of vibration platform schemes with vertical oscillations and analysis of compaction parameter control possibilities]. In *Enerhooshchadni mashyny i tekhnolohii – Energy-Saving Machines and Technologies (Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference, Kyiv, May 17–19, 2022, pp. 28–31)*. Kyiv: KNUBA.
 5. Maslov, O. H., Salenko, Yu. S., Zhovtiak, I. I., Vakulenko, R. A., & Diatlovska, V. L. (2020). Doslidzhennia vibratsiinoho orhanu dlia ushchilnennia betonnykh sumishei z vibroimpulsnymy kolyvanniamy [Investigation of a vibration unit for compaction of concrete mixtures with vibro-impulse oscillations]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 5–6, 139–146. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2020_5-6_21
 6. Nazarenko, I., Diedov, O., Diachenko, O., & Sviderskyi, A. (2017). Ohliad i analiz vibratsiinoho obladnannia dlia formuvannia ploskykh zalizobetonnykh vyrobiv [Review and analysis of vibration equipment for forming flat reinforced concrete products]. *Girnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Melioration Machines*, (90), 49–58.
 7. Serdiuk, L. I., Davydenko, Yu. O., & Kostenko, P. M. (2005). Deiaki pidkhody do modelivannia seredovyshcha, shcho obrobliatsia vibratsiynym prystroiem [Some approaches to modeling the medium processed by a vibration device]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy – Resource-Saving Materials, Structures, Buildings and Facilities*, (12), 69–72.
 8. Nesterenko, M. M., & Vedmid, V. V. (2025). Doslidzhennia vplyvu vertykalnykh vibratsiinykh rezhymiv na vzaiemodiiu robochoho orhanu vibroploshchadky z betonnoiu sumishshiu [Investigation of the influence of vertical vibration modes on the interaction of the vibration platform working body with a concrete mixture]. *Transactions of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, (2), 182–188. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.23>
 9. Vedmid, V. V., Nesterenko, T. M., Nesterenko, M. M., & Pyrlyk, M. O. (2025). Eksperymentalni doslidzhennia kombinovanoi impulsno-vibratsiinoi ustanovky [Experimental studies of a combined impulse-vibration installation]. *Systemni tekhnolohii – System Technologies*, 5(160), 178–188. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19>.

УДК 621.867.52

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0610>**¹Максим Пирлик,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1343-9516>, e-mail: maxpirlik@gmail.com**¹Микола Нестеренко**

кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4073-1233>, e-mail : nesterenkonikola@gmail.com¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
просп. Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна**АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕЗІНЕРЦІЙНОГО ПРИВАНТАЖУВАЧА ДЛЯ ДОУЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ**

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто динамічні особливості роботи вібраційної установки з безінерційним імпульсним привантажувачем та автономним віброзбуджувачем, призначеної для доущільнення бетонних сумішей. Запропоновано узагальнену математичну модель коливального процесу, яка враховує гармонічно-імпульсний характер збудження, нелінійні пружно-дисипативні властивості бетонної суміші та хвильові процеси поширення напружень у шарі матеріалу. На основі еквівалентної лінеаризації отримано амплітудно-залежні характеристики системи та проаналізовано умови реалізації квазірезонансного імпульсно-вібраційного режиму. Обґрунтовано вплив фазової синхронізації імпульсних навантажень, параметрів привантажувача та частот збудження на формування вищих гармонік і пікових динамічних напружень, ефективних для доущільнення верхніх шарів бетонної суміші. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації вібраційного обладнання для формування бетонних і залізобетонних виробів з підвищеними вимогами до якості та енергоефективності технологічного процесу.

Ключові слова: вібраційна установка, імпульсний привантажувач, доущільнення бетонних сумішей, нелінійні коливання, імпульсно-вібраційний режим, хвильові процеси, енергоефективність.

ANALYTICAL SUBSTITUTION OF THE PARAMETERS OF AN INERTIAL-FREE LOADER FOR COMPACTING CONCRETE MIXTURES

ABSTRACT. The article examines the dynamic features of a vibration installation with a non-inertial impulse surcharge and an autonomous vibration exciter intended for the additional compaction of concrete mixtures. A generalized mathematical model of the oscillatory process is proposed, which takes into account the harmonic–impulse nature of excitation, the nonlinear elastic–dissipative properties of the concrete mixture, and wave processes of stress propagation within the material layer. Based on the method of equivalent linearization, amplitude-dependent characteristics of the system are obtained and the conditions for the implementation of a quasi-resonant impulse–vibration regime are analyzed. The influence of phase synchronization of impulse loads, surcharge parameters, and excitation frequencies on the formation of higher harmonics and peak dynamic stresses effective for the additional compaction of the upper layers of the concrete mixture is substantiated. The obtained results can be used in the design and modernization of vibration equipment for manufacturing concrete and reinforced concrete products with increased requirements for quality and energy efficiency of the technological process.

Keywords: vibration installation, impulse surcharge, additional compaction of concrete mixtures, nonlinear oscillations, impulse–vibration regime, wave processes, energy efficiency.

1. Постановка проблеми. У виробництві залізобетонних кілець для каналізаційних, водопровідних мереж та шахт прокладання інженерних комунікацій особливої актуальності набуває забезпечення рівномірного та ефективного доущільнення бетонної суміші після основного етапу формування. Традиційні вібраційні установки з інерційним збудженням не завжди забезпечують необхідну інтенсивність ущільнення в зонах підвищеної товщини стінок і складної геометрії виробів, що призводить до локальної неоднорідності структури бетону. Застосування безінерційних привантажувачів з автономними віброзбуджувачами

відкриває можливості цілеспрямованого керування силовим і кінематичним впливом на бетонну суміш у процесі доущільнення. Водночас відсутність обґрунтованих параметрів режимів роботи таких систем ускладнює їх практичне впровадження в технології виготовлення кільцевих залізобетонних виробів. Особливо складним є узгодження частотно-амплітудних характеристик привантажувача з реологічними властивостями бетонної суміші на пізніх стадіях ущільнення. У зв'язку з цим виникає необхідність наукового обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для забезпечення підвищеної якості та однорідності структури залізобетонних кілець.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Проблематика керованого ущільнення та доущільнення бетонних сумішей у вібраційних установках традиційно розглядається через призму взаємодії робочого органу (вібраційної плити, форми або платформи) з оброблюваним середовищем, що має пружно-в'язко-дисипативні властивості, які істотно змінюються в процесі ущільнення. Узагальнений інженерний підхід до опису вібраційних систем та їх параметричного синтезу (частота, амплітуда, фаза, режими збудження) подано в роботі, де систематизовано методи розрахунку динаміки, резонансних режимів та енергетичних критеріїв для вібромашин різного призначення [4]. У контексті бетонних сумішей ці положення є методологічною базою для вибору режимів збудження, але потребують деталізації щодо нелінійності та нестационарності параметрів середовища на стадії доущільнення, коли суміш переходить від структурно-рухомого стану до більш жорсткого.

Важливий напрям досліджень пов'язаний із моделюванням оброблюваного середовища як динамічної підсистеми. У роботі, присвяченій підходам до моделювання середовища, що обробляється вібраційним пристроєм, акцент зроблено на виборі еквівалентних параметрів (маса, жорсткість, демпфування), формах подання дисипативних втрат та узгодженні моделі з експериментальними спостереженнями [2]. Це дозволяє переходити від суто кінематичного призначення режимів до параметрично обґрунтованого впливу, однак для задачі доущільнення виробів типу залізобетонних кілець додатково важливо враховувати просторову нерівномірність ущільнення по товщині стінки та висоті виробу, а також можливі хвильові ефекти передачі напружень у шарі суміші.

Окремий клас праць присвячений безпосередньо взаємодії віброуючої плити з цементобетонною сумішшю та встановленню закономірностей зміни контактних сил, ефективних параметрів жорсткості й дисипації та умов, за яких забезпечується інтенсивна перебудова структури суміші [3], [5]. Такі результати важливі для задач синтезу режимів роботи, оскільки демонструють, що «суміш» не може розглядатися як лінійне середовище з постійними параметрами: ефективні характеристики залежать від амплітуди, частоти, ступеня ущільнення та умов контакту. Проте наведені підходи здебільшого орієнтовані на класичні схеми збудження та не завжди враховують специфіку гармонічно-імпульсних впливів і наявність окремого силового контуру привантаження, що є визначальним для безінерційних привантажувачів.

Розвиток тематики привантажувачів для ущільнення бетонів відображено у сучасній публікації, де розглянуто конструктивні рішення та принципи роботи навантажувачів і підкреслено їх роль у підвищенні якості ущільнення за рахунок керованого силового впливу [1]. Доповненням до цього є експериментальні дослідження комбінованої імпульсно-вібраційної установки, у яких показано практичну доцільність поєднання різних типів збудження та наведено результати, важливі для верифікації розрахункових моделей [6]. Разом із тим, навіть за наявності експериментальної бази, питання цілеспрямованого підбору режимів (частотно-амплітудних, фазових та імпульсних параметрів) саме для доущільнення виробів кільцевого типу залишається недостатньо формалізованим: потрібні критерії, що зв'язують режим привантажувача з якісними показниками ущільнення та однорідністю структури.

З погляду практичної експлуатації обладнання корисними є оглядові роботи щодо схем вібромайданчиків з вертикальними коливаннями та можливостей керування

параметрами ущільнення, які окреслюють інженерні резерви регулювання режимів і підходи до адаптації обладнання під різні вироби [7]. Узагальнюючи аналіз джерел, можна сформулювати ключову науково-прикладну прогалину: існують напрацювання з теорії вібраційних систем [4], моделювання середовища [2], вивчення взаємодії плити з сумішшю [3], [5], а також конструктивно-експериментальні результати щодо привантажувачів і комбінованих установок [1], [6], [7], однак бракує єдиного узгодженого підходу до обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем саме в режимі доущільнення залізобетонних кілець з урахуванням нелінійних властивостей суміші та зміни її динамічних характеристик у часі.

3. Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є наукове обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для підвищення ефективності доущільнення бетонних сумішей при виготовленні залізобетонних кілець інженерних мереж. Для досягнення поставленої мети передбачено розроблення узагальненої математичної моделі системи «привантажувач – форма – бетонна суміш» з урахуванням нелінійних пружно-дисипативних властивостей середовища та визначення раціональних частотно-амплітудних режимів роботи привантажувача. Завданням дослідження також є встановлення критеріїв вибору режимів доущільнення, що забезпечують підвищення однорідності структури та фізико-механічних характеристик залізобетонних кілець.

4. Обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача. На рисунку 1 наведено загальний вигляд вібраційної машини для ущільнення та доущільнення бетонних сумішей, призначеної для виготовлення кільцевих залізобетонних виробів, що застосовуються у каналізаційних, водопровідних мережах та шахтах для прокладання інженерних комунікацій. Конструкція машини реалізує принцип розділення контурів збудження та силового привантаження, що забезпечує керовану зміну режимів динамічного впливу на бетонну суміш без ускладнення загальної компоновки установки.



Рис. 1. Вібраційна машина для ущільнення: 1 – рама установки; 2 – форма; 3 – привантажувач; 4 – віброзбуджувач форми; 5 – віброзбуджувачі привантажувача
 Fig. 1. Vibrating compaction machine: 1 – installation frame; 2 – mold; 3 – loader; 4 – mold vibrator; 5 – loader vibrators

Несучою основою установки є рама (1), яка сприймає статичні та динамічні навантаження та забезпечує просторову жорсткість конструкції. Форма (2) для виготовлення залізобетонного кільця встановлюється безпосередньо на жорстку бетонну основу виробничої підлоги, що виключає використання віброізолюючих опор і зумовлює передачу значної частини динамічних зусиль у систему «форма – бетонна суміш – основа». Така схема

характерна для промислових технологій формування кільцевих виробів і потребує цілеспрямованого вибору параметрів вібраційного впливу.

Для створення коливального руху форми застосовується віброзбуджувач форми (4), який забезпечує первинне ущільнення бетонної суміші за рахунок гармонічних коливань. Основний процес доущільнення реалізується за допомогою безінерційного привантажувача (3), який контактує з верхньою поверхнею бетонної суміші та створює додаткове нормальне навантаження. Привантажувач оснащено автономними віброзбуджувачами (5), що формують незалежний коливальний процес і не мають жорсткого кінематичного зв'язку з віброзбуджувачем форми.

Ключовою особливістю розглянутої конструкції є можливість незалежного керування параметрами коливань привантажувача та форми, що дозволяє реалізовувати комбінований гармонічно-імпульсний вплив на бетонну суміш. За відсутності віброізоляції така схема сприяє більш інтенсивній передачі напружень у бетонне середовище, особливо на завершальній стадії ущільнення, коли ефективні пружно-дисипативні характеристики суміші істотно зростають. Це створює передумови для підвищення щільності та однорідності структури залізобетонних кілець без суттєвого збільшення енергетичних витрат.

Розглянемо систему, що складається з: привантажувача масою m_p , форми масою m_f , та шару бетонної суміші висотою h і площею контакту S . Узагальнені переміщення: $z_p(t)$ вертикальне переміщення робочого органу привантажувача; переміщення форми. Оскільки форма спирається на жорстку основу, зв'язок «форма–підлога» описуємо великою жорсткістю k_0 та демпфуванням c_0 (або граничним випадком $z_f(t) \approx 0$).

Бетонну суміш у “зосередженій” постановці подаємо як нелінійну пружно-дисипативну ланку між привантажувачем і формою з силою взаємодії $F_c(\Delta z, \Delta \dot{z})$, де $\Delta z = z_p - z_f$, $\Delta \dot{z} = \dot{z}_p - \dot{z}_f$

Нелінійний характер середовища враховуємо у вигляді поліноміальної жорсткості та в'язкого опору (поширена форма для еквівалентного опису ущільнюваних сумішей) [2], [3], [5]:

$$F_c(\Delta z, \Delta \dot{z}) = k_1 \Delta z + k_3 (\Delta z)^3 + c_1 \Delta \dot{z} + c_3 (\Delta \dot{z})^3 \quad (1)$$

Збудження від віброзбуджувача форми задаємо як гармонічну силу: $F_f(t) = F_{f0} \sin(\omega_f t)$

Автономні віброзбуджувачі привантажувача формують гармонічний (можливо фазозсунутий) вплив: $F_p(t) = F_{p0} \sin(\omega_p t + \varphi)$.

Якщо реалізується імпульсна складова привантаження (удар/короткий імпульс сили), її зручно описувати сумою коротких імпульсів:

$$F_{\text{imp}}(t) = \sum_{k=1}^N P_k g(t - t_k), \quad (2)$$

де P_k – імпульс (інтеграл сили за часом), g – нормована форма імпульсу (прямокутна, напівсинус, експонента тощо). Такий запис природно пояснює появу вищих гармонік у спектрі коливань і напружень, що є принципово важливим для інтенсивного доущільнення [4], [6].

Тоді рівняння руху мають вигляд:

$$m_p \ddot{z}_p + F_c(\Delta z, \Delta \dot{z}) = F_p(t) + F_{\text{imp}}(t), \quad (3)$$

$$m_f \ddot{z}_f + c_0 \dot{z}_f + k_0 z_f - F_c(\Delta z, \Delta \dot{z}) = F_f(t). \quad (4)$$

Жорстка основа задається гранично великими k_0 , що в практичному наближенні дає: $z_f(t) \approx 0$, $\dot{z}_f(t) \approx 0$.

Тоді модель спрощується до одного рівняння для привантажувача відносно «нерухомої основи»:

$$m_p \ddot{z}_p + k_1 z_p + k_3 z_p^3 + c_1 \dot{z}_p + c_3 \dot{z}_p^3 = F_p(t) + F_{\text{imp}}(t). \quad (5)$$

Для інженерного синтезу режимів зручно перейти до еквівалентних амплітудно-залежних коефіцієнтів жорсткості та демпфування:

$$k_{\text{eff}}(A) = k_1 + \frac{4}{3}k_3A^2, \quad (6)$$

$$c_{\text{eff}}(A) = c_1 + \frac{4}{3}c_3(A\omega)^2, \quad (7)$$

де A – усталена амплітуда коливань робочого органа, ω – робоча кругова частота. Тоді наближено отримуємо лінійне рівняння:

$$m_p \ddot{z}_p + c_{\text{eff}}(A) \dot{z}_p + k_{\text{eff}}(A) z_p \approx F_p(t) + F_{\text{imp}}(t). \quad (8)$$

Відповідна амплітудна характеристика (для гармонічного режиму без імпульсів) записується стандартно [4]:

$$A(\omega) = \frac{F_{p0}}{\sqrt{(k_{\text{eff}}(A) - m_p \omega^2)^2 + (c_{\text{eff}}(A) \omega)^2}}. \quad (9)$$

Цей зв'язок використовується для підбору режиму, за якого при зростанні жорсткості суміші на завершальній стадії ущільнення зберігається потрібний рівень динамічних прискорень [3], [5], [6].

Щоб врахувати нерівномірність ущільнення по висоті шару та поширення напружень, бетонну суміш можна описати як одновимірне в'язкопружне середовище зі зведеною швидкістю хвилі c_w і коефіцієнтом затухання ζ [2]:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + 2\zeta \omega_w \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} = c_w^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq h, \quad (10)$$

де $u(x, t)$ – переміщення частинок суміші вздовж висоти xxx .

Граничні умови для нашого випадку “жорстка підлога”:

на нижній межі контакт з основою: $u(h,t) = 0$

на верхній межі (дія привантажувача): напруження визначається прикладеною силою:

$$\sigma(0, t) = E \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{F_p(t) + F_{\text{imp}}(t)}{s}, \quad (11)$$

Така постановка дозволяє оцінювати максимальні напруження σ_{max} , їх спектр, вищі гармоніки від імпульсів, а також умови узгодження частоти з товщиною шару [2], [4].

5. Висновки У роботі виконано обґрунтування параметрів безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем для процесу доущільнення бетонних сумішей при виготовленні залізобетонних кілець, що формуються безпосередньо на жорсткій бетонній основі. Запропоновано узагальнену математичну модель системи «привантажувач – бетонна суміш – форма – основа», яка враховує нелінійні пружно-дисипативні властивості бетонного середовища, відсутність віброізоляції та можливість незалежного керування режимами коливань форми і привантажувача. Показано, що застосування автономного гармонічно-імпульсного збудження привантажувача забезпечує формування амплітудно-залежних динамічних режимів, за яких зростає інтенсивність передачі напружень у шар бетонної суміші та активізується її структурна перебудова на завершальній стадії ущільнення.

На основі еквівалентної лінеаризації отримано залежності ефективних жорсткісних і демпфувальних характеристик бетонної суміші від амплітуди коливань, що дозволяє раціонально підбирати частотно-амплітудні параметри роботи безінерційного привантажувача з урахуванням зміни властивостей середовища в процесі ущільнення. З використанням хвильової моделі показано, що за відсутності віброізоляції особливого значення набуває узгодження частоти збудження з геометричними параметрами шару суміші, оскільки це забезпечує більш рівномірний розподіл напружень по висоті та товщині залізобетонних кілець.

Список використаних джерел:

1. Nesterenko M. Loaders for Concrete Compaction / M. Nesterenko, O. Panfilov, M. Pyrlyk // Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering. – 2023. – Vol. 2, Iss. 61. – P. 80-85. – DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3874>
2. Сердюк Л.І., Давиденко Ю.О., Костенко П.М. Деякі підходи до моделювання середовища, що обробляється вібраційним пристроєм // Ресурсоекономні матер., констр., будівлі та споруди. – Рівне : НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 69–72.
3. Маслов, О., Саленко, Ю., & Маслова, Н. (2011). Дослідження взаємодії віброуючої плити з цементобетонною сумішшю. Вісник КНУ імені Михайла Остроградського, (2/201 (67), ч. 1), 93–98.
4. Назаренко, І. І. (2010). Прикладні задачі теорії вібраційних систем (2-е вид.). Київ. 440 с.
5. Maslov A.G., Salenko J.S., Maslova N.A. Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture // Вісник КНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 2 (67). – С. 93–98.
6. Ведмідь В.В. Експериментальні дослідження комбінованої імпульсно-вібраційної установки / В.В. Ведмідь, Т.М. Нестеренко, М.М. Нестеренко, М.О. Пирлик // Системні технології. – 2025. – Т. 5, № 160. – С. 178–188. – URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19> .
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/2237>
7. Дьяченко О., Пригоцький В., Маліцький І. Огляд схем вібромайданчиків з вертикальними коливаннями та аналіз можливостей керування параметрами ущільнення // Енергоощадні машини і технології : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 17–19 трав. 2022 р.). – Київ : КНУБА, 2022. – С. 28–31.

References:

1. Nesterenko, M., Panfilov, O., & Pyrlyk, M. (2023). Loaders for concrete compaction. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering, 2(61), 80–85. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3874>
2. Serdiuk, L. I., Davydenko, Yu. O., & Kostenko, P. M. (2005). Some approaches to modeling a medium processed by a vibration device [Deiaki pidkholdy do modeliuvannia seredovyshcha, shcho obrobliaisia vibratsiinym prystroiem]. Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings and Constructions – Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy, 12, 69–72. Rivne: NUWM.
3. Maslov, O., Salenko, Yu., & Maslova, N. (2011). Investigation of interaction between a vibrating plate and cement concrete mixture [Doslidzhennia vzaemodii vibruiochoi plyty z tsementobetonnoiu sumishshiu]. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University – Visnyk KNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 2(67), Pt. 1, 93–98.
4. Nazarenko, I. I. (2010). Applied problems of vibration systems theory [Prykladni zadachi teorii vibratsiinyykh system] (2nd ed.). Kyiv, Ukraine.
5. Maslov, A. G., Salenko, J. S., & Maslova, N. A. (2011). Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, 2(67), 93–98.
6. Vedmid, V. V., Nesterenko, T. M., Nesterenko, M. M., & Pyrlyk, M. O. (2025). Experimental studies of a combined impulse–vibration installation [Eksperymentalni doslidzhennia kombinovanoi impulsno-vibratsiinoyi ustanovky]. System Technologies, 5(160), 178–188. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19>
7. Diachenko, O., Pryhotskyi, V., & Malitskyi, I. (2022). Review of vibration platform schemes with vertical oscillations and analysis of compaction control possibilities [Ohliad skhem vibromaidanchykyv z vertykalnymy kolyvanniamy ta analiz mozhlyvostei keruvannia parametryamy ushchilnennia]. In Energy-Saving Machines and Technologies: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (pp. 28–31). Kyiv: KNUCA.

УДК 621.867.522

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0611>**¹Тетяна Нестеренко,**

доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2387-8575>, e-mail : poltava.tanya.nesterenko@gmail.com**¹Юрій Тікан**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID : <https://orcid.org/0009-0007-5547-1693>, e-mail : spaceagroteam@ukr.net¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
просп. Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНИХ ТРАНСПОРТЕРІВ З НЕЛІНІЙНИМИ ПРУЖНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто динамічні характеристики резонансних вібраційних транспортерів з нелінійними пружними зв'язками та виконано оптимізацію їх геометричних параметрів на основі спектрального аналізу вигинних коливань робочого органа. Запропоновано узагальнену математичну модель, яка враховує нелінійність жорсткісних характеристик опор і міжсекційних з'єднань, а також інерційний і дисипативний внесок транспортованого середовища. Проаналізовано вплив довжини секцій і параметрів пружних елементів на спектр власних частот та умови виникнення небезпечних резонансних режимів, у тому числі з урахуванням вищих гармонік збудження. Обґрунтовано критерії вибору раціональних геометричних параметрів, спрямовані на підвищення стабільності роботи, енергоефективності та довговічності обладнання. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації вібраційних транспортерів для гірничодобувної, будівельної, металургійної та агропромислової галузей.

Ключові слова: вібраційний транспортер, резонансні коливання, нелінійні пружні зв'язки, спектральний аналіз, геометрична оптимізація, енергоефективність, транспортування сипких матеріалів, буровий розчин.

OPTIMIZATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF VIBRATING CONVEYORS WITH NONLINEAR ELASTIC CONNECTIONS

ABSTRACT. This paper investigates the dynamic characteristics of resonant vibrating conveyors with nonlinear elastic connections and performs optimization of their geometric parameters based on spectral analysis of bending vibrations of the working body. A generalized mathematical model is proposed, which accounts for the nonlinear stiffness characteristics of the supports and inter-section joints, as well as the inertial and dissipative contributions of the transported material. The influence of section length and elastic parameters on the spectrum of natural frequencies and the conditions for the occurrence of dangerous resonant regimes, including higher harmonics of excitation, is analyzed. Criteria for selecting rational geometric parameters aimed at improving operational stability, energy efficiency, and service life of the equipment are substantiated. The obtained results can be applied in the design and modernization of vibrating conveyors for mining, construction, metallurgical, and agro-industrial applications.

Keywords: vibrating conveyor, resonant vibrations, nonlinear elastic connections, spectral analysis, geometric optimization, energy efficiency, bulk material handling, drilling mud.

1. Постановка проблеми. Вібраційні транспортери широко застосовуються в гірничодобувній, нафтовій, будівельній, металургійній, хімічній та агропромисловій галузях для транспортування, дозування та сортування сипких і кускових матеріалів. Зростання вимог до продуктивності, енергоефективності та надійності технологічного обладнання зумовлює необхідність удосконалення конструкцій вібраційних транспортерів і розроблення ефективних методів їх раціонального проектування.

Особливу увагу привертають резонансні вібраційні транспортери, які забезпечують високі амплітуди коливань за відносно малих енерговитрат. Однак їх експлуатація пов'язана з підвищеною чутливістю до зміни маси транспортованого матеріалу та ризиком виникнення

небажаних резонансних режимів, що може призводити до зростання динамічних навантажень, зниження довговічності елементів конструкції та порушення стабільності транспортного процесу.

Однією з ключових інженерних задач є визначення раціональних геометричних параметрів резонансних вібраційних транспортерів, насамперед довжини секцій, яка безпосередньо впливає на спектр власних частот вигинних коливань робочого органа. Зі збільшенням довжини транспортуючої поверхні відбувається зниження власних частот, що може спричинити їх зближення з робочою частотою збудження та формування небезпечних динамічних режимів.

Додаткову складність становить наявність нелінійних пружних зв'язків, жорсткісні характеристики яких залежать від амплітуди коливань, що ускладнює аналітичний опис динаміки системи та потребує застосування спеціальних методів лінеаризації і спектрального аналізу. Більшість існуючих методик проектування базується на спрощених лінійних моделях, які не забезпечують достатньої точності оцінювання динамічних характеристик резонансних вібраційних транспортерів.

У зв'язку з цим актуальною є задача розроблення узагальненої математичної моделі резонансного вібраційного транспортера з урахуванням нелінійних пружних зв'язків та оптимізація його геометричних параметрів на основі спектрального аналізу вигинних коливань, що дозволить підвищити енергоефективність, стабільність роботи та довговічність обладнання.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Питання підвищення ефективності транспортування сипких матеріалів вібраційними транспортерами залишається актуальним у зв'язку з вимогами до енергоощадності, стабільності режимів та довговічності обладнання. У прикладних роботах, присвячених вібраційним транспортно-маніпулюючим конвеєрам для пакувального обладнання, узагальнено конструктивні підходи до формування коливального руху робочих органів, а також показано роль кінематичних та силових параметрів у забезпеченні технологічної надійності систем переміщення виробів і матеріалів [1]. Важливий внесок у розвиток теоретичних основ високоефективних коливальних систем зроблено в монографічних дослідженнях, де систематизовано міжрезонансні режими, принципи керування коливаннями та підходи до підвищення енергоефективності вібраційних машин з електромагнітним приводом, що може бути використано як методологічна база при аналізі резонансних транспортних систем [2].

У вітчизняних публікаціях останніх років акцентовано увагу на оптимізації конструкції вібраційних транспортерів для сучасної промисловості, зокрема на впливі конструктивних рішень на продуктивність, енерговитрати та експлуатаційну надійність при транспортуванні сипких матеріалів [3]. Оглядово-аналітичні дослідження конструкцій і практики застосування вібраційних конвеєрів узагальнюють типові схеми приводів, підвісок і робочих органів, а також підкреслюють проблематику стабілізації амплітуди та зменшення динамічних навантажень у широкому діапазоні режимів роботи [4]. Додаткові приклади інженерних рішень і модульних виконань вібраційних конвеєрів, орієнтованих на багатофункціональне транспортування та інтеграцію у виробничі лінії, висвітлені в матеріалах виробників, що демонструють прикладні підходи до компонування та експлуатаційних переваг промислових систем [5–7].

Окремим напрямом сучасних досліджень є аналіз нелінійної динаміки коливальних систем і явищ самосинхронізації. У роботах з теорії синхронізації двох збуджувачів у нелінійних вібраційних системах показано, що наявність нелінійностей та множинних резонансних типів істотно впливає на встановлення стійких режимів і на розподіл енергії в системі, що є принципово важливим для резонансних транспортерів із нелінійними пружними зв'язками [8]. Дослідження впливу конструктивних параметрів на рух лотка та самосинхронізацію інерційних вібраторів деталізують роль геометрії, жорсткісних характеристик підвісок і параметрів збудження у формуванні траєкторій коливань та робочих режимів транспортера [9]. Також відомі підходи до вирівнювання транспортної швидкості у двонапрямних вібраційних конвеєрах, що підкреслює необхідність комплексного врахування

динамічних характеристик робочого органа для забезпечення заданої продуктивності та керованості процесу транспортування [10].

3. Мета і завдання дослідження. Метою статті є оптимізація геометричних параметрів резонансних вібраційних транспортерів з нелінійними пружними зв'язками на основі спектрального аналізу вигинних коливань робочого органа з метою підвищення стабільності роботи, енергоефективності та довговічності обладнання.

Для досягнення поставленої мети у роботі розглянуто фізичну та розрахункову моделі резонансного вібраційного транспортера, проаналізовано вплив нелінійних пружних зв'язків на динамічні характеристики системи.

Завданнями дослідження є розробка узагальненої математичної моделі коливань робочого органа вібраційного транспортера з урахуванням нелінійних пружних зв'язків, формування методики лінеаризації жорсткісних характеристик і визначення приведених параметрів системи, аналіз впливу довжини робочого органа на спектр власних частот та обґрунтування раціональних геометричних параметрів секцій транспортера з метою уникнення небезпечних резонансних режимів і підвищення стабільності його роботи.

4. Дослідження динамічних характеристик вібраційного транспортера з нелінійними пружними зв'язками.

Для дослідження динамічних характеристик вібраційного транспортера з нелінійними пружними зв'язками розглянемо узагальнену конструктивну схему секціонованого віброконвеєра, робочий орган якого складається з уніфікованих лінійних секцій, з'єднаних між собою шарнірними вузлами. Приводна секція може розміщуватися в довільному положенні, що забезпечує гнучке компонування транспортної системи залежно від технологічних вимог. Опорні вузли виконані у вигляді пружних віброізоляторів, а між робочими органами встановлені основні пружні зв'язки з нелінійною жорсткісною характеристикою. Збудження коливань здійснюється ексцентриковими віброзбуджувачами, завдяки чому реалізується режим резонансної роботи системи.

З огляду на симетрію коливальної системи та з метою спрощення аналізу розглядаємо вигинні коливання одного робочого органа, які описуються моделлю пружної балки постійного поперечного перерізу зі вільними кінцями та рівномірно розподіленою по довжині масою. Робочий орган взаємодіє з основою через систему нелінійних пружних елементів, жорсткісні характеристики яких залежать від амплітуди коливань і зумовлюють виникнення вищих гармонік у спектрі коливального процесу. На рисунку 1. показано лабораторний вібраційний транспортер який використовується для транспортування насипних вантажів.



Рис. 1. Вібраційний транспортер
Fig. 1. Vibrating conveyor

З урахуванням підходів до математичного опису вібромашин, що передбачають введення транспортованого середовища (приведена маса та приведений опір) і

представлення робочого органа як розподіленої системи, робочий орган моделюється пружною балкою (або тонкостінним коробом) постійного перерізу довжини l з рівномірно розподіленою масою m та жорсткістю EI . Вплив матеріалу враховується через приведені доданки m_{eq} (інерційний внесок середовища) та c_{eq} (дисипативний внесок), що залежать від заповнення, гранулометрії та режиму переміщення. У такому разі рівняння вимушуючих коливань записується у вигляді:

$$EI \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} + (m + m_{eq}) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + c_{eq} \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} + q_{nl}(y(x,t)) = p(x,t) \quad (1)$$

де $y(x,t)$ – прогин робочого органа в перерізі з координатою x у момент часу t ; $q_{nl}(y)$ – нелінійна узагальнена реакція пружних зв'язків (підвісок/опор/міжсекційних вузлів); $p(x,t)$ – розподілене збудження, пов'язане з дією віброзбуджувача та передачею зусиль через силову схему

Такий запис є зручним для подальшого переходу до частотної області та аналізу спектра форм коливань, що критично для обґрунтування раціональної довжини секцій

Нелінійність пружних зв'язків (наявність зазорів, контактних ділянок, гумометалевих елементів) зумовлює залежність еквівалентної жорсткості від амплітуди:

$$q_{nl}(y) = k_1 y + k_3 y^3 + \dots \quad (2)$$

або в інженерній формі через еквівалентну (лінійаризовану) жорсткість $k_{eq}(A)$, визначену методом гармонічного балансу, що є типовим шляхом переходу від нелінійної моделі до частотного аналізу. Тоді:

$$q_{nl}(y) \approx k_{eq}(A) y \quad (3)$$

$$k_{eq} = k_{eq} \left(\frac{A}{e} \right) \quad (4)$$

де A — амплітуда коливань, e — характерний зазор/параметр нелінійності (як у моделях із контактною роботою пружних елементів).

Оскільки нелінійна система формує полігармонійний відгук, часовий закон коливань доцільно подавати як ряд Фур'є:

$$y(x,t) = \sum_{n=1}^N y_n(x) \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (5)$$

де складові $n \geq 2$ (вищі гармоніки) стають суттєвими при зростанні A/e або при роботі поблизу параметричних резонансів. Для інженерних оцінок використовується підхід «домінування першої гармоніки» з уточненням внеску $2\omega, 3\omega$ у критичних режимах (зокрема для оцінки динамічних напружень і перевантажень на стиках секцій).

Частотна задача та залежність спектра від геометрії та довжини секції для першої гармоніки записується наступним рівнянням (6) з якого отримуємо крайову задачу (7)

$$y(x,t) = Y(x) \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$EIY^{(4)}(x) - (m + m_{eq})\omega^2 Y(x) + k_{eq}(A)Y(x) = P(x) \quad (7)$$

де $P(x)$ – еквівалентний розподіл збуджуючих дій. Для оцінки власних частот (без зовнішнього збудження) маємо:

$$EIY^{(4)}(x) + k_{eq}(A)Y(x) = (m + m_{eq})\omega_k^2 Y(x) \quad (8)$$

Звідси випливає принципово важливий результат для оптимізації: частоти ω_k є функцією довжини секції l , жорсткості EI , приведених параметрів середовища (m_{eq}, c_{eq}) та рівня нелінійності $k_{eq}(A)$. Тобто:

$$\omega_k = \omega_k(l, EI, m + m_{eq}, k_{eq}(A)) \quad (9)$$

Це створює формальну основу для обґрунтування раціональної довжини секцій як такої, що забезпечує частотний «запас» відносно робочої частоти:

$$|\omega - \omega_k(l)| \geq \Delta \quad (10)$$

де Δ – припустима відстань від небезпечних зон резонансів у практиці проектування часто задається у відсотках від робочої частоти.

У межах удосконаленої моделі вибір геометричних параметрів (насамперед l , а також кроку опор і компоновки секцій) формулюється як задача оптимізації з двома групами критеріїв:

- динамічна безпека (віддаленість від резонансів з урахуванням вищих гармонік),
- енергоефективність (зменшення витрат потужності при забезпеченні потрібної транспортної швидкості).

У загальному вигляді:

$$l_{\min} = \arg \min_l P(l, A, \omega) \quad (11)$$

За умови

$$|\omega - \omega_k(l)| \geq \Delta, \quad |n\omega - \omega_j(l)| \geq \Delta_n, \quad n = 2, 3, \dots y(x, t) = \sum_{n=1}^N y_n(x) \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

де додаткові обмеження для $n\omega$ враховують можливість небезпечних “попадань” вищих гармонік у власні частоти системи (що особливо критично для довгих секцій і конструкцій з вираженою нелінійністю зв’язків). Саме включення цих умов є однією з ключових відмінностей удосконаленої постановки від класичного частотного підходу.

5. Висновки

У роботі розглянуто задачу оптимізації геометричних параметрів резонансних вібраційних транспортерів з нелінійними пружними зв’язками на основі спектрального аналізу вигинних коливань робочого органа. Запропоновано узагальнену математичну модель, яка враховує нелінійність жорсткісних характеристик опор та міжсекційних з’єднань, а також інерційний і дисипативний внесок транспортованого середовища. Це дозволило більш адекватно описати реальні динамічні процеси, характерні для резонансних режимів роботи.

Отримано аналітичні залежності власних частот від довжини секцій, жорсткості пружних зв’язків та амплітуди коливань, що дало змогу встановити закономірності впливу геометричних параметрів на спектральні характеристики системи. Показано, що зі збільшенням довжини робочого органа відбувається зниження власних частот і зростає ймовірність зближення з робочою частотою та її вищими гармоніками, що може призводити до виникнення небезпечних резонансних режимів і зростання динамічних навантажень.

Запропоновано критерій вибору раціональної довжини секцій, який ґрунтується на забезпеченні частотного запасу відносно основної та вищих гармонік збудження, а також на мінімізації енергоспоживання при збереженні заданої продуктивності транспортера. Сформульовано задачу оптимізації геометричних параметрів з урахуванням умов динамічної безпеки та енергоефективності.

Отримані результати створюють теоретичну основу для інженерного проектування секціонованих резонансних вібраційних транспортерів із підвищеною стабільністю роботи, довговічністю та зниженими енергетичними витратами. Запропонований підхід може бути використаний при розробленні нових конструкцій транспортних систем для гірничодобувної, будівельної, металургійної та агропромислової галузей, а також для модернізації існуючого обладнання.

Список використаних джерел:

1. Корендій, В.М. Вібраційні транспортно-маніпулюючі конвеєри для пакувального обладнання / В.М. Корендій, О.В. Гаврильченко, В.С. Шенбор // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2018. – № 891. – С. 35 – 41.

2. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): Монографія. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2008. – 324 с.
3. Оптимізація конструкцій вібраційних транспортерів для транспортування сипких матеріалів у сучасній промисловості / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, Ю.М. Тікан, О.В. Квасневський // Тези 77-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (16 травня – 22 травня 2025 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2025. – Т. 1. – С. 247-249
4. Вібраційні конвеєри, особливості будови та експлуатації / М.М. Нестеренко, Ю.М. Тікан, Т.М. Нестеренко, & А.І. Аніщенко // Техніка будівництва : наук.-техн. журн. – К.: КНУБА, 2025. – Вип. 42. – С. 92–101.– <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0510>
5. <https://bruks-siwertell.com/conveying/vibrating-conveyor> – Vibrating conveyors ensure efficient, multi-functional material handling
6. <https://www.generalkinematics.com/product-category/bulk-processing-solutions/vibrating-conveyors/> – Vibrating Transfer Conveyors
7. <https://vibrotech-eng.com/en/products/vibrating-conveyors/> – Vibrating Conveyors
8. Zhang X, Wen B, Zhao C. Theoretical study on synchronization of two exciters in a nonlinear vibrating system with multiple resonant types. *Nonlinear Dynamics*. 2016 Jul;85(1):141–154.
9. Cieplak, Grzegorz. "Influence of vibratory conveyor design parameters on the trough motion and the self-synchronization of inertial vibrators" *Open Engineering*, vol. 14, no. 1, 2024, pp. 20220434. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0434>
10. Czubak P. Equalization of the transport velocity in a new two-way vibratory conveyor. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 11, 2011.

References:

1. Korendii, V. M., Havrylchenko, O. V., & Shenbor, V. S. (2018). Vibratsiini transportno-manipuliuiuchi konveiry dlia pakovalnoho obladnannia [Vibrational transport-manipulating conveyors for packaging equipment]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Seriya: Optymizatsiia vyrobnychykh protsesiv i tekhnichniy kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni – Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series: Optimization of production processes and technical control in mechanical engineering and instrument engineering*, (891), 35–41.
2. Lanets, O. S. (2008). *Vysokoeffektyvni mizhrezonansni vibratsiini mashyny z elektromahnitnym pryvodom (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia)* [Highly efficient inter-resonant vibration machines with electromagnetic drive (Theoretical foundations and practical implementation)]. Lviv Polytechnic National University Publishing House.
3. Nazarenko, I. I., Nesterenko, M. M., Tikan, Yu. M., & Kvasnevskiy, O. V. (2025). Optymizatsiia konstruktzii vibratsiinykh transporteriv dlia transportuvannia syvkykh materialiv u suchasnyy promyslovosti [Optimization of vibratory conveyor designs for bulk material transportation in modern industry]. In *Abstracts of the 77th scientific conference of professors, lecturers, researchers, postgraduate students and students (May 16–22, 2025)* (Vol. 1, pp. 247–249). Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic National University.
4. Nesterenko, M. M., Tikan, Yu. M., Nesterenko, T. M., & Anishchenko, A. I. (2025). Vibratsiini konveiry, osoblyvosti budovy ta ekspluatatsii [Vibratory conveyors: Design features and operational characteristics]. *Tekhnika budivnytstva – Construction Engineering*, 42, 92–101. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0510>
5. Bruks Siwertell. (2024). *Vibrating conveyors ensure efficient, multi-functional material handling*. <https://bruks-siwertell.com/conveying/vibrating-conveyor>
6. General Kinematics. (2024). *Vibrating transfer conveyors*. <https://www.generalkinematics.com/product-category/bulk-processing-solutions/vibrating-conveyors/>
7. Vibrotech Engineering. (2024). *Vibrating conveyors*. <https://vibrotech-eng.com/en/products/vibrating-conveyors/>
8. Zhang, X., Wen, B., & Zhao, C. (2016). Theoretical study on synchronization of two exciters in a nonlinear vibrating system with multiple resonant types. *Nonlinear Dynamics*, 85(1), 141–154. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2690-7>
9. Cieplak, G. (2024). Influence of vibratory conveyor design parameters on the trough motion and the self-synchronization of inertial vibrators. *Open Engineering*, 14(1), 20220434. <https://doi.org/10.1515/eng-2022-0434>
10. Czubak, P. (2011). Equalization of the transport velocity in a new two-way vibratory conveyor. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11, 573–586.

УДК 66.001.5:693.546

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0612>**¹Денис Сідан,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7945-5615>, e-mail: sidan-denis@meta.ua**¹Тетяна Нестеренко,**

доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій

ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-2387-8575>, e-mail : poltava.tanya.nesterenko@gmail.com¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп. Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна

АНАЛІТИКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПІДБІР КОНСТРУКЦІЇ ШНЕКА ЕКСТРУДЕРА ДЛЯ АДИТИВНОГО ФОРМУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто конструктивно-технологічні особливості процесу подачі будівельних сумішей у зону друку будівельного 3D-принтера із використанням шнекового екструдера. Обґрунтовано визначальний вплив геометричних і кінематичних параметрів шнека на продуктивність екструзії, стабільність потоку та якість формування адитивного шару. Запропоновано аналітичний підхід до опису процесу шнекової екструзії, який враховує взаємодію конструктивних параметрів гвинтового органа (діаметр, крок витка, глибина каналу, ступінь стиснення) з реологічними властивостями в'язкопластичних будівельних сумішей.

Розроблено конструкцію дослідного екструдера та створено 3D-моделі шнеків із різними значеннями кроку гвинтової нарізки. Проведено експериментальні дослідження процесу подачі гіпсової суміші з визначенням крутного моменту на валу шнека та маси матеріалу, що транспортується за один оберт. Отримані експериментальні дані оброблено методами математичної статистики з використанням регресійного аналізу, у результаті чого встановлено кількісну залежність між кроком шнека та енергосиловими параметрами екструзії.

Підтверджено, що зменшення кроку шнека сприяє підвищенню масової продуктивності подачі, однак супроводжується зростанням крутного моменту та навантаження на привод екструдера. На основі побудованої поліноміальної регресійної моделі визначено характер впливу конструктивних параметрів шнека на робочі показники екструзійної системи та обґрунтовано раціональні діапазони їх вибору.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації екструдерів будівельних 3D-принтерів, підборі електроприводів, а також при оптимізації технологічних режимів адитивного виготовлення будівельних конструкцій із забезпеченням підвищеної якості формування шару та енергоефективності процесу друку.

Ключові слова: будівельний 3D-принтер, шнековий екструдер, будівельна суміш, подача матеріалу, крутний момент, параметри шнека, регресійна модель, якість друку, адитивне будівництво.

ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL SELECTION OF SCREW EXTRUDER DESIGN FOR ADDITIVE FORMATION OF BUILDING STRUCTURES

ABSTRACT. The article examines the structural and technological features of the process of supplying building mixtures to the printing zone of a construction 3D printer using a screw extruder. The decisive influence of the geometric and kinematic parameters of the screw on extrusion productivity, flow stability, and the quality of additive layer formation is substantiated. An analytical approach to describing the screw extrusion process is proposed, taking into account the interaction between the design parameters of the screw working body (diameter, pitch, channel depth, compression ratio) and the rheological properties of viscoplastic building mixtures.

The design of an experimental extruder was developed, and 3D models of screws with different helix pitches were created. Experimental studies of gypsum mixture feeding were carried out with determination of the torque on the screw shaft and the mass of material transported per revolution. The obtained experimental data were processed using mathematical statistics methods and regression analysis, which made it possible to establish a quantitative relationship between screw pitch and the energy–power parameters of extrusion.

It was confirmed that reducing the screw pitch increases the mass productivity of material feeding but is accompanied by an increase in torque and drive load. Based on the constructed polynomial regression model, the nature of the influence of screw design parameters on the operating characteristics of the extrusion system was determined, and rational ranges for their selection were substantiated.

The obtained results can be used in the design and modernization of construction 3D printer extruders, in the selection of electric drives, and in the optimization of technological modes of additive manufacturing of building structures while ensuring improved layer formation quality and energy efficiency of the printing process.

Keywords: *construction 3D printer, screw extruder, building mixture, material feeding, torque, screw parameters, regression model, print quality, additive construction.*

1. Постановка проблеми. Адитивні технології у будівництві на сьогодні формують один із найбільш перспективних і технологічно динамічних напрямів розвитку сучасного машинобудування та будівельної індустрії. Застосування будівельних 3D-принтерів забезпечує автоматизацію процесу зведення конструкцій, зменшення трудомісткості та матеріаломісткості робіт, підвищення швидкості будівництва, а також відкриває можливості реалізації складних архітектурно-конструктивних форм, що практично недосяжні традиційними методами [2, 4, 5]. Упродовж останніх років у наукових і прикладних дослідженнях запропоновано широкий спектр конструктивних рішень будівельних 3D-принтерів — від порталних і консольних систем до роботизованих і мобільних комплексів великого будівельного масштабу [3, 6–9].

Ключовим технологічним вузлом будь-якого будівельного 3D-принтера є система подачі та формування будівельної суміші, центральним елементом якої виступає екструдер. Саме параметри та конструкція екструдера визначають стабільність екструзії, рівномірність формування шару, точність геометрії друку та адгезію між шарами, що безпосередньо впливає на міцність і довговічність готових конструкцій [9, 11, 12]. На відміну від полімерного 3D-друку, у будівельних технологіях екструзії підлягають цементні, гіпсові та композиційні суміші, які характеризуються неньютонівськими, в'язкопластичними та тиксотропними властивостями. Їх реологічна поведінка істотно залежить від швидкості зсуву, гранулометричного складу, водоцементного відношення та наявності модифікуючих добавок, що ускладнює забезпечення стабільної подачі матеріалу.

Найбільш поширеним типом екструзійних систем у будівельному 3D-друці є шнекові екструдери, які забезпечують примусову, безперервну та дозовану подачу суміші до формуючої головки [6, 11]. Ефективність їх роботи визначається конструктивно-геометричними параметрами шнека — діаметром, кроком витка, глибиною гвинтового каналу, ступенем стиснення, довжиною робочих зон і частотою обертання. Невідповідність цих параметрів властивостям суміші призводить до пульсацій подачі, розшарування матеріалу, утворення порожнин, підвищеного енергоспоживання або навіть до блокування екструдера й зриву процесу друку.

Особливої актуальності набуває задача підвищення якості подачі будівельної суміші в зону друку. Якість подачі визначається не лише продуктивністю, а й однорідністю структури потоку, відсутністю повітряних включень, стабільністю тиску в екструзійному каналі та узгодженістю швидкості видавлювання з траєкторією руху друкувальної головки. Саме ці фактори формують геометричну точність шару, його щільність і несучу здатність [11, 12].

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених загальним питанням будівельного 3D-друку, проблема обґрунтованого підбору конструкції шнека екструдера залишається недостатньо висвітленою. У більшості випадків використовуються адаптовані шнеки полімерних екструдерів або емпірично спроектовані гвинтові органи без урахування специфіки будівельних сумішей та режимів їх екструзії [2, 6, 7]. Відсутність системного підходу до параметричного синтезу конструкції шнека обмежує можливості підвищення якості друку та енергоефективності обладнання.

Крім того, у доступних наукових джерелах недостатньо представлено аналітико-експериментальні залежності між геометрією шнека та показниками процесу подачі — продуктивністю, тиском екструзії, крутним моментом на валу, структурною однорідністю суміші. Бракує також статистично обґрунтованих моделей, які дозволяли б прогнозувати якість подачі матеріалу залежно від конструктивних параметрів шнека та реологічних характеристик суміші.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Фундаментальні засади будівельного 3D-друку сформовано у працях, присвячених техно-логії контурного будівництва та роботизованому формуванню конструкцій, де визначено роль екструзійних систем у забезпеченні безперервності адитивного процесу [4]. Узагальнення інноваційних технологій 3D-друку будівельних об'єктів і класифікацію обладнання наведено в роботах [1, 6], де підкреслюється значення конструктивної адаптації екструдерів до властивостей сумішей.

Оглядові та популяризаційні видання з адитивного виробництва акцентують увагу на тому, що стабільність подачі матеріалу є ключовою інженерною проблемою масштабного 3D-друку [3]. У дослідженнях мегамасштабного друку та мобільних будівельних роботів показано тенденції до збільшення продуктивності екструзійних систем і необхідність узгодження їх параметрів із технолого-гією формування шару [2, 7, 8].

У роботах українських науковців розглянуто конструкції мобільних комплексів будівельних 3D-принтерів, лабораторних установок і екструзійних вузлів, що забезпечують подачу бетонних сумішей у зону друку [9, 10]. Аналітичні дослідження процесу депонування бетонної суміші екструдером дозволили встановити взаємозв'язок між параметрами подачі та якістю сформованого шару [11]. Також проведено аналіз конструкцій будівельних 3D-принтерів і визначено напрями вдосконалення їх екструзійних систем [12].

Разом із тим, наявні дослідження переважно зосереджені на компоновці обладнання, кінематиці позиціонування та технологічних режимах друку. Питання ж конструктивного синтезу шнека екструдера — з урахуванням геометрії гвинтового каналу, зональної організації процесу подачі та впливу цих параметрів на якість екструзії будівельних сумішей — залишаються недостатньо опрацьованими, що й зумовлює актуальність даного дослідження.

3. Мета і завдання дослідження. Метою роботи є обґрунтування та розроблення науково-методичного підходу до підбору конструкції шнека екструдера будівельного 3D-принтера, який на основі аналітичного моделювання та експериментальних досліджень забезпечить підвищення якості подачі будівельної суміші в зону друку, стабільність екструзії, зниження енергетичних витрат і розширення можливостей проектування ефективних екструзійних систем для адитивного виготовлення будівельних конструкцій.

Завданнями дослідження є розроблення науково обґрунтованого підходу до підбору конструкції шнека екструдера будівельного 3D-принтера з урахуванням реологічних і технологічних властивостей будівельних сумішей, формування узагальненої аналітичної моделі процесу шнекової екструзії, що описує взаємозв'язок між геометричними параметрами шнека (діаметр, крок витка, глибина каналу, ступінь стиснення, довжина робочих зон) і показниками подачі матеріалу, визначення впливу кінематичних режимів роботи (частоти обертання, крутного моменту, швидкості транспортування) на продуктивність, стабільність і рівномірність екструзії, аналіз напружено-деформованого та гідродинамічного стану суміші в гвинтовому каналі з урахуванням її ньютонівських в'язкопластичних властивостей, експериментальне дослідження процесу подачі будівельної суміші шнеками різної геометрії з оцінкою якості формування потоку та однорідності структури матеріалу, статистична обробка отриманих результатів і побудова регресійних залежностей між параметрами шнека та показниками якості подачі, а також обґрунтування раціональних конструктивно-кінематичних параметрів шнека екструдера з метою підвищення стабільності подачі будівельної суміші в зону друку та покращення якості формування адитивних будівельних шарів.

4. Основний матеріал

Шнекові пристрої (гвинтові механізми) широко застосовуються в транспортуючих, дозувальних і пресових машинах для переміщення, ущільнення та формування матеріалів різної природи. У загальному випадку шнековий механізм складається з циліндричного кожуха з приймальним бункером і формувальним вихідним отвором, усередині якого розміщений один або декілька шнеків. До основних переваг шнекових систем належать компактність, конструктивна простота, можливість регулювання подачі матеріалу та стабільність робочого процесу.

У будівельних 3D-принтерах шнековий екструдер виконує ключову функцію — забезпечує примусову, дозовану та безперервну подачу пластичної будівельної суміші (цементної або гіпсової) до формуючого сопла. Особливістю цього процесу є робота з в'язкопластичними матеріалами, які характеризуються значною внутрішньою адгезією, тертям та змінними реологічними властивостями.

Геометрія шнека шнека утворюється рухом твірної лінії (прямої або кривої) навколо та вздовж осі шнека. Осьовий розмір, що відповідає підйому цієї лінії за один повний оберт, називається кроком шнека H . Залежно від конструкції, шнеки можуть мати: постійний або змінний крок; постійний або змінний діаметр; безперервну або переривчасту гвинтову поверхню.

На рисунку 1. зображено типи шнеків які можна використовувати для подачі будівельної суміші з екструдера.

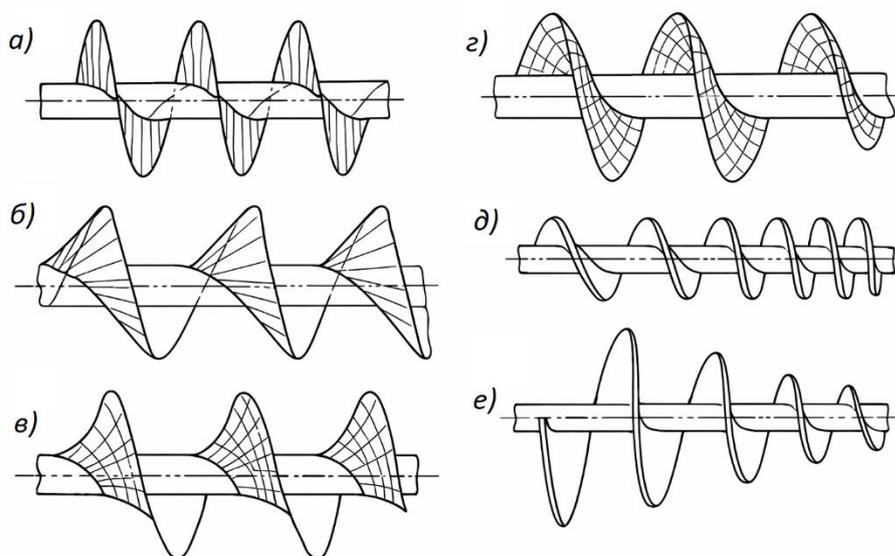


Рис. 1. Схеми шнеків із гвинтовою поверхнею: а – прямий; б – косий; в, г – кривий; д – зі змінним кроком; е – зі змінним діаметром

Fig. 1. Schemes of screws with a helical surface: a – straight; b – oblique; c, d – curved; d – with variable pitch; e – with variable diameter

Для аналітичного опису роботи шнека зручно розглядати розгортку гвинтової лінії на площину. При цьому отримується так званий шаговий трикутник, основа якого дорівнює довжині розгортки кола πD , а висота — кроку гвинтової лінії H . Кут між гвинтовою лінією та основою циліндра визначає кут підйому гвинтової лінії α , який обчислюється як:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\pi D}{H}, \quad (1)$$

Цей кут є одним з основних параметрів, що визначають здатність шнека до осьового переміщення матеріалу.

Рух частинок матеріалу в шнековому каналі є складним і відбувається не прямолінійно, а по гвинтових траєкторіях уздовж і навколо осі шнека. При відсутності тертя матеріал переміщувався б перпендикулярно до гвинтової поверхні, однак у реальних умовах на рух істотно впливають: тертя частинок матеріалу об поверхню шнека; внутрішнє тертя та адгезія між частинками матеріалу; протидіючий тиск у формувальній зоні (мундштуку).

За наявності сил тертя осьове переміщення частинок зменшується, що враховується введенням коефіцієнта відставання або коефіцієнта кінематичного зсуву. Осьовий шлях частинки за один оберт шнека можна подати у вигляді:

$$h = H(\cos \alpha - f \sin \alpha) \cos \alpha, \quad (2)$$

де f – коефіцієнт тертя матеріалу об гвинтову поверхню шнека.

З урахуванням цього ефективна подача матеріалу завжди є меншою за геометричний крок шнека, що особливо важливо для пластичних будівельних сумішей.

Продуктивність шнекового пристрою визначається об'ємом матеріалу, що транспортується за одиницю часу. Для шнеків, що працюють із пластичними матеріалами, продуктивність можна оцінити як добуток корисного міжвиткового об'єму на кутову швидкість обертання шнека:

$$Q = 0,125(D^2 - d^2)(H - \delta)k\rho\omega, \quad (3)$$

де D – зовнішній діаметр шнека; d – діаметр вала; δ – товщина витка; ρ – густина матеріалу; k – коефіцієнт заповнення міжвиткового простору; ω – кутова швидкість обертання шнека.

З формули випливає, що продуктивність істотно залежить від кроку шнека, а також від умов заповнення та реологічних властивостей матеріалу, що подається.

Для забезпечення подачі матеріалу шнек повинен долати сили тертя, внутрішній опір матеріалу та тиск у зоні формування. Крутний момент на валу шнека можна визначити з урахуванням осьового тиску матеріалу:

$$M = \frac{\rho H^3 \tan^2 \varphi k_1 k_2 k_3 k_4}{4\pi^2}, \quad (4)$$

де ρ – осьовий тиск матеріалу; φ – кут тертя; $k_1 k_2 k_3 k_4$ – коефіцієнти, що враховують ковзання матеріалу, активність останнього витка, боковий тиск та зміну тиску по зонах шнека.

Отриманий крутний момент є базовим параметром для підбору електроприводу екструдера будівельного 3D-принтера та оцінки енергетичної ефективності процесу друку.

Робота екструзійного обладнання залежить від конструктивних характеристик екструдера, серед яких основними є тип шнека, його профіль та режим обертання. Найбільш поширеними є шнекові екструдери, також відомі як черв'ячні преси, завдяки своїй здатності рівномірно транспортувати матеріал і мінімізувати утворення повітряних включень. Проте існують і безшнекові (дискові) екструдери, де для транспортування суміші використовується диск спеціальної форми. У складних випадках застосовують комбіновані черв'ячно-дискові екструдери, які забезпечують як змішувальний, так і екструзійний ефекти, особливо ефективні при роботі з багатокомпонентними сумішами.

Особливу увагу приділяють профілю каналу шнека, що може бути із змінною глибиною спірального каналу або змінним кроком. Це дозволяє адаптувати подачу суміші залежно від її фізичних характеристик та вимог до процесу друку. Вибір оптимальних параметрів шнека, таких як глибина та крок спірального каналу, сприяє збільшенню ефективності подачі суміші та поліпшенню кінцевої якості виробу.

Для досягнення однорідного потоку матеріалу і запобігання виникненню повітряних включень часто застосовують одношнекові екструдери без зони дегазації. Проте в разі підвищених вимог до якості кінцевого виробу використовують двошнекові або комбіновані системи з осцилюючим шнеком, які дозволяють досягати високої якості укладеного шару і підвищують щільність структури суміші.

Сучасне проектування систем екструзії для 3D друку є результатом глибокого вивчення реологічних властивостей матеріалів і ітеративного вдосконалення конструкцій. Параметри, як-от текучість і екструзабельність, мають ключове значення для оптимального функціонування системи та забезпечення високої якості будівельних конструкцій.

Система екструзії 3D-принтера є надзвичайно важливою частиною загального процесу аддитивного виробництва, особливо для будівельних конструкцій. Багато параметрів впливають на ефективність екструзії будівельних сумішей, серед яких критичними є конструкція екструдера, параметри екструзії, текучість та екструзабельність матеріалу.

Дизайн екструзійного бункера та системи подачі матеріалу часто є результатом ітеративного підходу, заснованого на реологічних властивостях матеріалів. Оптимальний дизайн передбачає бункер для завантаження матеріалу, гвинтовий транспортер, форсунку для формування виходу матеріалу, редукторний двигун для приводу шнека, а також скребок для перемішування, що забезпечує стабільну подачу матеріалу. Важливо враховувати діаметр бункера відповідно до розміру шнека та проектувати його з оптимальним кутом нахилу для забезпечення масового режиму руху, що мінімізує проблеми нестабільної течії, сегрегації матеріалів та деградації частинок у стоячих областях. Для друку цементних сумішей важливо уникати гострих кутів у бункері, що знижує тиск і забезпечує плавний потік матеріалу до екструдера.

Для екструзії неньютонівських псевдопластичних матеріалів, які характеризуються зменшенням в'язкості при зсуві, рекомендується встановлення лопастей або скребоків у бункері для перемішування суміші, що знижує ефективне зсувне напруження і сприяє однорідності матеріалу. Лопасті або скребки також можуть доповнюватися вібраційним мотором для підвищення текучості і щільності суміші. Така система дозволяє бункеру функціонувати як самостійна екструзійна установка для середніх розмірів друку, без необхідності додаткових насосів.

Підбір конструкції екструдера також є ключовим етапом у налаштуванні процесу 3D-друку. Розмір форсунки визначає вихідну форму матеріалу, що безпосередньо впливає на роздільну здатність друку та геометричну точність кінцевої структури. Залежно від розмірів та конструкції об'єкта форсунка може змінюватися, що дозволяє обирати оптимальні параметри для друку будівельних матеріалів. Наприклад, різні розміри форсунок дозволяють тестувати різні режими та зразки, що допомагає визначити найефективніші налаштування екструзії.

Як показують дослідження, ключовими параметрами, що впливають на успішність друку, є швидкість переміщення каретки, швидкість екструзії та висота шару. Для визначення оптимальних налаштувань друку використовуються 3D-моделі або експериментальні зразки. У дослідженні [16] прямокутний зразок розміром 150x150x100 мм використовувався для вивчення впливу таких параметрів, як швидкість руху каретки, висота шару та швидкість екструзії. Початкові налаштування показали, що висота шару 15 мм та швидкість каретки 30 мм/с не підходять, оскільки це призвело до неуспішного друку через нерівномірність шару. Коригування параметрів, зокрема, зменшення висоти шару до 10 мм та зниження швидкості руху каретки до 20 мм/с, дозволило досягти стабільного результату.

Спостереження за якістю нанесення шару вказують на важливість ретельного вибору параметрів друку для кожного конкретного випадку. Наприклад, при швидкості екструзії, налаштованій відповідно до швидкості обертання двигуна, можна оптимізувати подачу матеріалу в залежності від його реологічних властивостей, забезпечуючи належну якість друку.

В якості початкового параметра для розрахунку 3d будівельного принтера встановлюється основний параметр - діаметр шнека D .

Крок нарізки t та глибина витка h суттєво впливають на продуктивність шнекової машини 3D-принтера. Крок витка в зоні завантаження визначається не тільки коефіцієнтом тертя матеріалу о шнек і стінки матеріального циліндра, але й швидкістю подачі матеріалу

для друку та вимогами щодо якості друку. Для зони завантаження рекомендується приймати крок від 0,7 до 1,5D, з урахуванням специфічних вимог 3D-принтера.

Для зони дозування нарізка шнека може враховувати властивості матеріалів, які використовуються в 3D-друці, такі як температурна чутливість, і забезпечувати необхідну точність друку. Рекомендується враховувати основні параметри: швидкість та стабільність подачі матеріалу для друку при виборі кроку нарізки t .

Додатково, при роботі з цементною або гіпсовою сумішшю, важливо враховувати їхні особливості, такі як в'язкість та температурні умови для досягнення оптимальних результатів друку. Також слід розглядати вибір матеріалів шнека та конструктивні особливості з урахуванням вимог, що стосуються обробки цементної або гіпсової суміші.

$$t = (0,8 \dots 1,2)D, \quad (5)$$

У контексті 3D-принтера, де точність і рівномірність подачі матеріалу є критичними факторами для якості друку, обрання кроку нарізки t рівним діаметру шнека ($t = D$) може бути важливим кроком для забезпечення оптимальних умов друку. Це дозволяє досягти не тільки стабільної і рівномірної подачі матеріалу, але також спрощує технологічний процес виготовлення шнека для 3D-принтера.

Додатково, для досягнення високих ступенів стиснення матеріалу при друці можуть бути використані шнеки зі змінним за довжиною кроком нарізки. Це може бути корисно для регулювання параметрів друку в залежності від властивостей конкретного матеріалу та вимог до якості друку.

При виборі глибини винтового каналу важливо враховувати особливості матеріалу, які використовуються у 3D-друці, такі як температурна чутливість та потреба в точності друку. Рекомендації щодо глибини винтового каналу можуть бути адаптовані з урахуванням конкретних умов та вимог, характерних для 3D-принтера та матеріалів, які використовуються.

Для 3D-принтера важливим є не лише оптимальна глибина винтового каналу в зонах питання та дозування, але і врахування особливостей процесу друку.

У зоні завантаження, глибина винтового каналу також повинна враховувати можливі варіації властивостей матеріалу та його подачу в принтер.

$$h_1 = (0.12 \dots 0.16)D, \quad (6)$$

В зоні дозування для 3D-принтера, крім забезпечення точності друку, важливо враховувати потреби в рівномірній подачі матеріалу та можливість швидкого регулювання глибини винтового каналу для адаптації до різних умов друку та властивостей матеріалу.

$$h_3 = 0.5 \left[D - \sqrt{D^2 - \frac{4h_1}{i}(D - h_1)} \right], \quad (7)$$

Вибір ступеня стиснення матеріалу (i) на основі Таблиці 2.1 визначається врахуванням конкретних рекомендацій для кожного матеріалу та виду виробу.

Вибір ступеня стиснення матеріалу (іноді також називається "ступенем живлення") для цементних або гіпсових сумішей може залежати від типу шнеку та його конструктивних параметрів. У загальному випадку, ступінь стиснення визначається відношенням глибини каналу в зоні живлення (поживлення) до глибини каналу в зоні дозування.

Ступінь стиснення цементної або гіпсової суміші залежить від декількох факторів, включаючи тип шнека. Шнек - це обертовий елемент, який використовується для перемішування та подачі матеріалу. Тип шнека може впливати на ступінь стиснення суміші наступними способами:

Діаметр шнека: Шнек з меншим діаметром створює більший тиск на суміш, що може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Швидкість шнека: Шнек з більшою швидкістю створює більший відцентровий тиск на суміш, що також може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Кут нахилу шнека: Шнек з більшим кутом нахилу створює більший обертовий момент, що також може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Загалом, шнеки з меншим діаметром, більшою швидкістю та більшим кутом нахилу будуть створювати більший тиск на суміш, що може призвести до підвищення ступеня стиснення.

Однак, важливо зазначити, що тип шнека не є єдиним фактором, який впливає на ступінь стиснення. Інші фактори, які можуть впливати на вибір ступеня стиснення, включають швидкість виходу матеріалу, величину і тип зерен матеріалу, його вологості та інші властивості.

З таблиці 1 можна взяти значення середнього градієнта швидкості зсуву γ , числа витків в зоні дозування, і відношення глибини каналу в зоні живлення та дозування для конкретного матеріалу та типу виробу.

Загальною метою визначення глибини винтового каналу для 3D-принтера є забезпечення стабільної та точної подачі матеріалу в процесі друку, що є ключовим для отримання високоякісних та деталізованих друківаних будівельних конструкцій.

Таблиця 1. Конструктивні параметри шнеків для викори-стання в 3D-принтерах
Table 1. Design parameters of auger for use in 3D printers

Полімерний матеріал	Середній градієнт швидкості зсуву γ , с^{-1}	Число витків в зоні дозування
Гіпсова суміш	15...20	4...6
Цементна суміш	10...23	3...6

Глибина винтового каналу, кількість витків та коефіцієнт стиснення визначаються з урахуванням властивостей конкретного матеріалу та типу виробу для досягнення оптимальних умов обробки.

У зоні пластифікації (стиснення).

$$h_2 = h_1 - \frac{h_1 - h_3}{L} L_0, \quad (8)$$

$$L_0 = L - L_H, \quad (9)$$

де L – довжина шнека, см; L_0 – довжина шнека до зони стиснення, см; L_H – довжина тикової частини шнека, см.

$$L_H = (0.4 \dots 0.6)L, \quad (10)$$

Ширина гребня витка шнека e рекомендується приймати такою, щоб уникнути збільшення потужності, оскільки збільшення товщини витка призводить до зростання витрати енергії, тоді як зменшення її може призвести до утворення значного потоку витоків через зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека.

$$e = (0,06 \dots 0,1)D, \quad (11)$$

Менші значення рекомендується приймати для діаметрів шнека більше 125 мм, тоді як більші значення – для діаметрів менше 125 мм. Радіальний зазор між внутрішньою поверхнею матеріального циліндра та зовнішньою поверхнею витка шнека рекомендується приймати

$$\delta = (0,002 \dots 0,005)D, \quad (12)$$

При цьому менші значення приймаються для великих діаметрів шнеків. Частота обертання шнека суттєво впливає на продуктивність шнекових машин. Її зростання спостерігається до певного значення частоти обертання шнека (критичного), після чого починається нестійке рух матеріалу (частинки матеріалу припиняють рухатися в осьовому напрямку і лише обертаються разом із шнеком). Це призводить до зменшення

продуктивності, збільшення споживаної потужності та збільшеного зносу робочих частин машини.

Величину критичної частоти обертання шнека в зоні завантаження шнекової машини можна визначити за наступним співвідношенням (с- 1):

$$n_{крит} = \frac{42,2}{60\sqrt{D}}, \quad (13)$$

де D – діаметр шнека, м

В зонах стиснення і дозування допустиму частоту обертання шнеків значно зменшують, щоб уникнути через мірного витіснення суміші.

Робоча частота обертання шнека дорівнює

$$n_p = (0,2 \dots 0,7)n_{крит}, \quad (14)$$

де нижні значення числових коефіцієнтів приймаються для малих діаметрів шнеків, верхні - для великих значень. На практиці частота обертання знаходиться в межах від 0,08 до 4,2 с⁻¹.

За наведеними формулами визначено наступні конструктивні розміри шнека для створення дослідного стенда пристосування, що дозволить визначити крутний момент шнека який потрібний для роботи бункера – екструдера та дозволить в майбутньому підібрати електроприводи принтера.

Прийнято шнек діаметром 38мм, висотою 42,5 мм. Та зовнішню частину – бункер із отвором для видавлювання гіпсової суміші діаметром 12 мм.

За допомогою програми SolidWorks було створено спіраль моделі шнека (рисунок 2) в двох варіантах. Перший варіант із шагом 17 мм другий варіант із шагом 12 мм.

Варіант моделі шнека із шагом 12 мм зроблено таким чином, що спіраль нахилена на 300 відносно горизонталі в низ. 3D моделі обох шнеків зображено на рисунку 3.

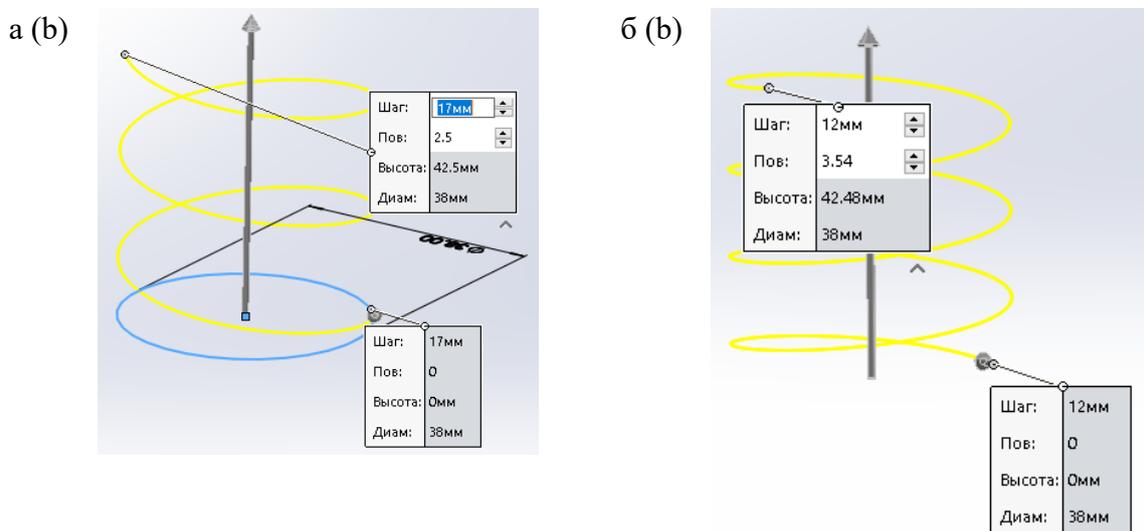
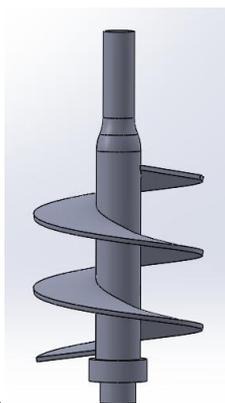


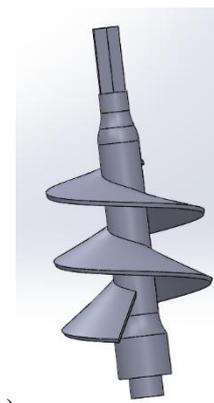
Рис. 2. Спіраль моделі шнека: а) із шагом 17 мм б) із шагом 12 мм
 Fig. 2. Spiral of the screw model: a) with a pitch of 17 mm b) with a pitch of 12 mm

Корпус бункера (рисунок 4) спроектовано таким чином щоб можна було провести дослідження із визначення крутного моменту шнека для роботи екструдера.

Також розроблена модель складального креслення пристосування для визначення крутного моменту шнека (Рисунок 5). Процес формування слоїв при друку на 3D-принтері відбувається поетапно шар за шаром до отримання проектної висоти.



а (a)



б (b)

Рис. 3. 3D моделі шнека: а) із шагом 17 мм б) із шагом 12 мм
 Fig. 3. 3D model of auger: a) in increments of 17 mm b) in increments of 12 mm

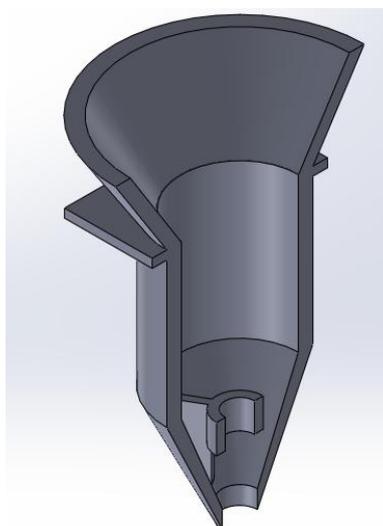


Рис. 4. 3D модель бункера
 Fig. 4. 3D model of the bunker

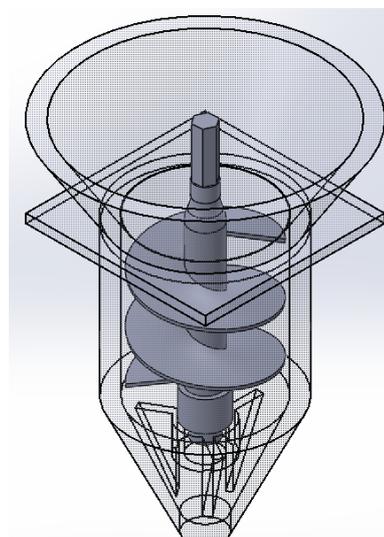


Рис. 5. 3D модель експериментального пристосування
 Fig. 5. 3D model of the experimental plant

Експериментальні дослідження робочих процесів обладнання для 3D-друку будівельних конструкцій повинно забезпечити проведення дослідження стосовно визначення крутного моменту який виникає на валу шнека для подальшого підбору електроприводу принтера.

За допомогою принтера для друку пластиком було виготовлені елементи екструдера (рис. 6).



Рис. 6. Роздруковані елементи екструдера
 Fig. 6. Fractured extruder elements

Дослід із визначення крутного моменту для шнека проводився наступним чином. На спеціальний штатив було закріплено екструдер в який було подано гіпсову суміш. Через плече 0,2 м було прикладене через кантер зусилля. Дослід проводився по 6 разів для кожного типу шнека.

В таблиці 2 наведено результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 14 мм.

Таблиця 2. Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 14 мм
Table 2. Research results and research calculations for a auger with a pitch of 14 mm

№ досліджу	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	1,60	0,2	0,320	32
2	1,52	0,2	0,304	35
3	1,48	0,2	0,296	38
4	1,62	0,2	0,324	29
5	1,54	0,2	0,309	41
6	1,36	0,2	0,273	39

В таблиці 3 наведено результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 12 мм.

Таблиця 3. Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 12 мм
Table 3. Research results and research calculations for a auger with a pitch of 12 mm

№ досліджу	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м).	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	1,85	0,2	0,370	44
2	1,80	0,2	0,360	48
3	1,76	0,2	0,352	47
4	1,92	0,2	0,384	43
5	1,84	0,2	0,368	49
6	1,96	0,2	0,392	48

Таблиця 4. Результати дослідження та обчислення досліджень для шнеку з шагом 16 мм
Table 4. Research results and research calculations for a auger with a pitch of 16 mm

№ досліджу	Сила, яка діє на важіль, F (Н),	Довжина важіля l (м)	Момент M (Н·м),	Маса суміші за оберт шнеку, г
1	2,18	0,2	0,436	34
2	1,96	0,2	0,392	38
3	2,23	0,2	0,446	42
4	2,32	0,2	0,464	36
5	2,04	0,2	0,408	40
6	2,11	0,2	0,422	32

Для шнека з шагом 14 було визначено кількість суміші яка виходила з екструдера при силах 1,60Н; 1,52Н; 1,48Н; 1,62Н; 1,54Н; 1,36Н видавалося гіпсової суміші 32 г; 35 г; 38 г; 29 г; 41 г; 39 г. Для шнека з шагом 12 було визначено кількість суміші яка виходила з екструдера при силах 1,85Н; 1,80Н; 1,76Н; 1,92Н; 1,84Н; 1,96Н видавалося гіпсової суміші 44 г; 48 г; 47 г; 43 г; 49 г; 48г.

Теоретичні основи обробки експериментальних даних
Побудова та дослідження статистичної матмоделі зводиться до:

- попередньо дослідження об'єкту;
- вибір критерію оптимізації;
- побудови статистичної матмоделі і оцінки її адекватності та відтворюваності;
- можливості використовувати дану модель для оптимізації процесу та установаження найраціональніших параметрів системи.

З метою визначення ступеню впливу фактору на критерій оцінки потрібно шляхом проведення експерименту установити залежність, яка досягається проведенням апроксимації.

Самим точним методом апроксимації вважають метод поліноміального опису даного процесу з використанням рівняння регресії, що у загальному випадку може бути представлено у вигляді:

Поліноміальна модель для проведення досліджень має вигляд

$$y_i = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 + \sum_{j=1}^k a_{ij} x_i x_j, \quad (15)$$

де $i, j = 1, 2, \dots, k$ – порядкові номери факторів; y_i – величина, яка оптимізується; x_i, x_j – вхідні фактори у кодованій формі; k – кількість факторів; a_0, a_i, a_{ii}, a_{ij} – коефіцієнти рівняння регресії.

Для визначення коефіцієнтів рівняння використовуються наступні формули

$$a_0 = \bar{y}_0, \quad (16)$$

$$a_i = A \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u, \quad (17)$$

$$a_{ii} = B \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + C_1 \sum_{j=1}^k \sum_{u=1}^N x_{ju}^2 y_u - \frac{y_0}{S}, \quad (18)$$

$$a_{ij} = D_1 \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u, \quad (19)$$

де \bar{y}_0 – середнє значення спостережень, зроблених у нульовій точці; N – число точок експерименту плану; A, B, C_1, D_1, S – постійні коефіцієнти, що визначаються структурою матриці планування.

Вибіркова дисперсія в u -ому досліді визначається за формулою

$$S_{yu}^2 = \frac{1}{\gamma_u - 1} \sum_{i=1}^{\gamma_u} (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (20)$$

де $f_u = (\gamma_u - 1)$ – ступень свободи; $\bar{y}_u = \frac{1}{\gamma_u} \sum_{i=1}^{\gamma_u} y_{ui}$ – математичне сподівання функції відгуку в u -тій точці експерименту.

Значимість коефіцієнтів регресії визначається за t -критерієм Стюдента. Коефіцієнт регресії вважається значущим, якщо

$$t_{\text{факт}} = \frac{a}{S_{(a_0, i, ii, ij)}} > t_{\text{табл}}, \quad (21)$$

де $S_{(a)}$ – дисперсія, що характеризує помилки у визначенні коефіцієнтів.

Вона визначається за формулами

$$S_{(a_0)}^2 = \frac{1}{n_0} S_{(y)}^2, \quad (22)$$

$$S_{(a_i)}^2 = A S_{(y)}^2, \quad (23)$$

$$S_{(a_{ii})}^2 = \left(B + \frac{1}{S^2 n_0} \right) S_{(y)}^2, \quad (24)$$

$$S_{(a_{ij})}^2 = D_1 S_{(y)}^2, \quad (25)$$

$$\text{де } S_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}.$$

Адекватність отриманої моделі результатам експерименту перевіряють за умовою Фішера

$$F \leq F_{табл}, \quad (26)$$

де $F_{табл}$ – табличне значення F-розподілу; $F = \frac{SS_L \cdot f_E}{SS_R \cdot f_L}$ – дисперсійне відношення; $SS_L = SS_R - SS_E$ – сума квадратів, пов'язана з дисперсією, що визначає неадекватність представлення результатів експерименту; $SS_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2$ – сума квадратів, пов'язана з дисперсією, що характеризує похибку досліду; $SS_R = \left[\sum_{u=1}^N y_u^2 - \frac{(\sum_{u=1}^N y_u)^2}{N} \right] - SS$ – остаточна сума квадратів.

Сума квадратів, пов'язана з отриманими коефіцієнтами регресії

$$SS = A \sum_{i=1}^k \left(\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \right)^2 + D_1 \sum_{i=1}^m \left(\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u \right)^2 + b_0 \sum_{u=1}^N y_u - \sum_{i=1}^k b_{ii} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - \frac{\left(\sum_{u=1}^N y_u \right)^2}{N} \quad (27)$$

Обробка результатів експериментальних даних.

Проведемо регресійного аналізу результатів однофакторного експерименту з використання системи STATISTICA. Зазначимо, що задача регресійного аналізу полягає в тому, щоб за дослідженнями вхідного (X) і вихідного (Y) параметрів:

- побудувати регресійну модель (рівняння регресії), тобто оцінити параметри моделі (коефіцієнти рівняння) найкращим чином;
- побудувати довірчі інтервали для коефіцієнтів моделі;
- перевірити гіпотезу значущості коефіцієнтів рівняння регресії;
- оцінити ступінь адекватності моделі і т.д.

Очевидно, що величина крутного моменту залежить від кроку шнека, тому залежною змінною (критерієм) Y є крутий момент, а незалежною змінною (фактором) X – крок шнеку.

Проведення регресійного аналізу відбуватиметься у кілька етапів. Побудуємо діаграму розсіювання експериментальних даних та графік для підгонки моделі оцінювання (та графіки з довірчим інтервалом 0,95) (рис. 7).

Із аналізу дослідних даних, розміщених на графічному відображенні результатів, робиться висновок про можливість побудови поліноміальної регресійної моделі другого порядку.

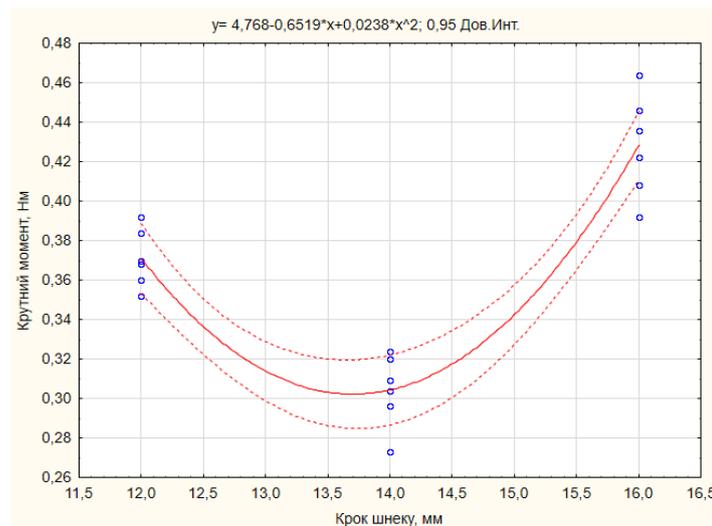


Рис. 7. Діаграма розсіювання експериментальних даних та графік для підгонки моделі оцінювання
 Fig. 7. Scatter plot of experimental data and plot for fitting the estimation model

Із аналізу дослідних даних, розміщених на графічному відображенні результатів, робиться висновок про можливість побудови поліноміальної регресійної моделі. Для побудови поліноміальної регресійної моделі в діалоговому вікні задається, що модель оцінювання «Fit» є поліноміальною «Polynomial» і натискається клавіша «ОК». В результаті

проведених операцій в окремому вікні відображається графік, у якому на точкові дані нанесена крива, яка автоматично описується рівнянням 2-го порядку (рис. 7). Рівняння многочлена представлено в заголовку графіка і має наступний вигляд:

$$Y=4.768-0.6519X+0.0238X^2, \quad (28)$$

Абсолютна величина кожного коефіцієнта в рівнянні регресії характеризує вплив фактора X на функцію відгуку (критерій) Y .

Для того, щоб проаналізувати регресійну модель, із головного меню системи статистика вибираємо пункт User-specified regression ($v_2=b_0+b_1*v_1+b_2*v_1^2$).

В якості методу оцінювання виберемо загальноприйнятий для технічних систем – квазіньютонівський. В методах нелінійного оцінювання важливо вірно підібрати початкові наближення.

Невідомими параметрами моделі є коефіцієнти b_0 , b_1 , b_2 . Натиснувши клавішу «Start values», відображається діалогове вікно, у якому потрібно ввести початкові значення, що отримані на основі попереднього графічного аналізу даних. Після дисперсійного аналізу отримаємо, уточнені значення коефіцієнтів b_0 , b_1 , b_2 (рис.8) та графік результуючої регресійної кривої, накладеної на дослідні дані (рис.9).

N=18	b0	b1	b2
Оцінка	4.768000	-0.651901	0.023791

Рис. 8. Результати розрахунку коефіцієнтів регресійної моделі
Fig. 8. Results of calculating the coefficients of the regression model

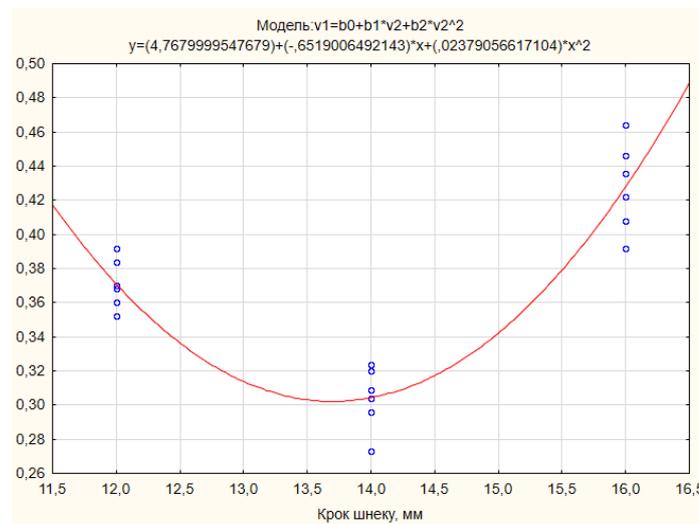


Рис. 9. Графік результуючої регресійної кривої, накладеної на дослідні дані
Fig. 9. Graph of the resulting regression curve superimposed on the experimental data

Тоді рівняння (28) можна переписати у вигляді

$$M=4.768-0.6519k+0.023791k^2, \quad (29)$$

де M – крутний момент, Нм; K – крок шнеку, мм.

З метою перевірки достовірності отриманого рівняння визначимо залишки, які отримані в результаті різниці між даними спостережень та результатами розрахунків за рівнянням 29 (рис. 10, 11).

Модель: $v_1 = b_0 + b_1 \cdot v_2 + b_2 \cdot v_2^2$			
Зал. Змінна: Крутний момент, Нм			
	Дані спостереження, Нм	Результати розрахунків за	Залишки
1	0,370000	0,371034	-0,001034
2	0,360000	0,371034	-0,011034
3	0,352000	0,371034	-0,019034
4	0,384000	0,371034	0,012966
5	0,368000	0,371034	-0,003034
6	0,392000	0,371034	0,020966
7	0,320000	0,304342	0,015658
8	0,304000	0,304342	-0,000342
9	0,296000	0,304342	-0,008342
10	0,324000	0,304342	0,019658
11	0,309000	0,304342	0,004658
12	0,273000	0,304342	-0,031342
13	0,436000	0,427975	0,008025
14	0,392000	0,427975	-0,035975
15	0,446000	0,427975	0,018025
16	0,464000	0,427975	0,036025
17	0,408000	0,427975	-0,019975
18	0,422000	0,427975	-0,005975

Рис. 10. Розрахунок залишків між експериментальними даними та за отриманим рівнянням регресії

Fig. 10. Calculation of residuals between experimental data and the obtained regression equation

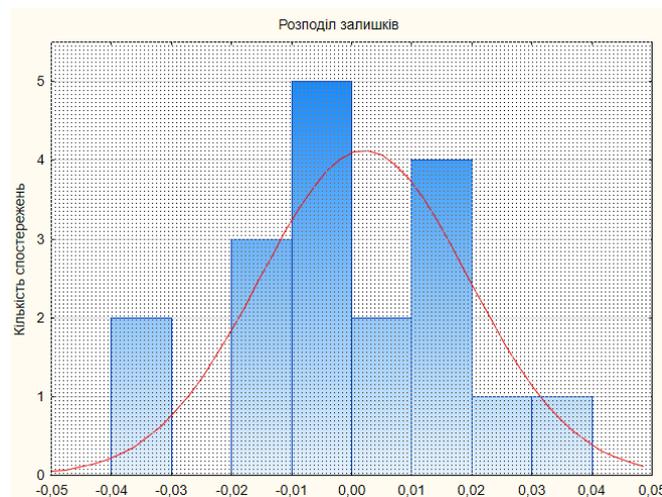


Рис. 11. Розподіл залишків
Fig. 11. Distribution of residuals

Проведемо дисперсійний аналіз результатів експерименту (рисунок 12), з метою перевірки значущості впливу кроку шнеку на значення крутного моменту. В стартовому вікні модуля «ANOVA» виберемо тип аналізу «One-way ANOVA» і метод «Quick specs dialog». Після натиснення клавіші «OK» в правому верхньому кутку вікна відкривається меню установки змінних і опцій аналізу.

	1 Крутний момент, Нм	2 Крок шнеку, мм
1	0,37	12
2	0,36	12
3	0,352	12
4	0,384	12
5	0,368	12
6	0,392	12
7	0,32	14
8	0,304	14
9	0,296	14
10	0,324	14
11	0,309	14
12	0,273	14
13	0,436	16
14	0,392	16
15	0,446	16
16	0,464	16
17	0,408	16
18	0,422	16

Рис. 12. Вибіркові дані

Fig. 12. Sample data

Факторною змінною є «Крок шнеку», а результуючою – «Крутний момент». Для їх введення потрібно натиснути клавішу «Variables» у вікні установки змінних та опцій аналізу та вибрати відповідні змінні у вікні аналізу.

Наступний етап передбачає вибір рівня значущості «Significance level», який задаємо рівним $\alpha=0,05$ і натискаємо клавішу «All effects».

При цьому відкривається вікно з результатами розрахунку компонентів варіації і перевірки гіпотези впливу фактору на результат з використанням статистики Фішера. Проаналізуємо отримані результати (рис. 13). Під час аналізу результатів рядок «Intercept» (Вільний член рівняння) не враховуємо.

Ефект	Сума квадратів, SS	Ступінь свободи свободи	Середній квадрат, MS	Критерій Фішера	Ймовірність, p
Вільний член рівня	2,434689	1	2,434689	5868,291	0,00
Крок шнеку, мм	0,045974	2	0,022987	55,405	1,18E-7
Помилка	0,006223	15	0,000415		

Рис. 13 Вікно результатів однофакторного дисперсійного аналізу

Fig. 13 Shows the results of one-way analysis of variance

Розрахували компоненти «Сума квадратів» (SS) 0,045974 і 0,006223 загальної варіації, яка обумовлена фактором «Крок шнеку» і неврахованими факторами. Відбулося визначення числа ступенів вільності («Degr. of Freedom») кожного компоненту. Зокрема, для компоненту варіації, що обумовлений факторною змінною, число ступенів вільності $(m-1)=2$, а для компоненту, обумовленого неврахованими факторами, число ступенів вільності дорівнює $m(n-1)=15$.

Розрахована величина «Середній квадрат» («MS») $Q_1^2/(m-1)=0.022987$ $Q_2^2/m(n-1)=0.000415$

Розрахували величину критерію Фішера, яка дорівнює:

$$F = \frac{Q_1^2/(m-1)}{Q_2^2/m(n-1)} = 55,405$$

При цьому система визначила ймовірність $p=0,0000000118$ того, що при справедливості нульової гіпотези ($F > F_\alpha$ – розрахункове значення; F_α – критична межа розподілу Фішера при рівні значущості) величина α може приймати такі ж, чи більші

значення. Оскільки ця ймовірність суттєво менша рівня значущості $\alpha=0,05$, то гіпотеза про вплив фактора «Крок шнеку» на значення крутного моменту є істинною.

5. Висновки

У результаті виконаного дослідження вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення якості подачі будівельної суміші в зону друку шляхом обґрунтованого підбору конструкції шнека екструдера будівельного 3D-принтера. На основі аналітичного розгляду процесу шнекової екструзії встановлено взаємозв'язок між геометричними параметрами шнека (діаметр, крок витка, глибина каналу, ступінь стиснення) та продуктивністю, енергетичними характеристиками й стабільністю подачі в'язкопластичних будівельних сумішей. Показано, що ефективність транспортування матеріалу визначається не лише геометричним кроком, а й реологічними властивостями суміші, коефіцієнтами тертя та протидіючим тиском у формувальній зоні.

У процесі експериментальних досліджень, виконаних на розробленому лабораторному пристосуванні, визначено крутний момент на валу шнека та масу суміші, що подається за один оберт, для різних значень кроку гвинтової нарізки. Отримані результати підтвердили суттєвий вплив кроку шнека на енергосилові та продуктивні параметри екструзії: зменшення кроку забезпечує зростання маси подачі за оберт, але супроводжується збільшенням крутного моменту та навантаження на привод.

Методами регресійного аналізу побудовано статистичну модель залежності крутного моменту від кроку шнека у вигляді поліноміального рівняння другого порядку, що адекватно описує експериментальні дані. Перевірка моделі за критеріями Стьюдента та Фішера підтвердила її статистичну значущість і можливість використання для інженерних розрахунків і прогнозування робочих параметрів екструдерів. Встановлено, що фактор «крок шнека» має визначальний вплив на величину крутного моменту, що необхідно враховувати під час підбору електроприводу 3D-принтера.

Практичним результатом роботи є обґрунтування раціональних конструктивних параметрів шнека екструдера, розроблення його 3D-моделей та створення експериментального стенда для дослідження процесу подачі будівельних сумішей. Отримані залежності та рекомендації можуть бути використані при проектуванні екструзійних вузлів будівельних 3D-принтерів, модернізації існуючого обладнання та оптимізації режимів адитивного формування будівельних конструкцій з підвищеними вимогами до якості шару та енергоефективності процесу.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні експериментальної бази для різних типів будівельних сумішей (цементних, гіпсових, композиційних), дослідженні багатощнекових і комбінованих екструдерів, а також у розробленні комплексних реологічно-механічних моделей процесу екструзії з урахуванням нестационарних режимів 3D-друку.

Список використаних джерел:

1. Шатов С.В., Савицкий Н.В., Карпушин С.А. (2017). Обобщение инновационных технологий 3D-печати строительных объектов для разработки стартапов. Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития. 99. 194-200.
2. Alwi A., Karayiannis S., Starkey B., Gardner M., Reodique K., Varley Th. (2013). «Contrucktion». MegaScale 3D Printing, Group 1: Final Report. Faculty of Engineering and Physical Sciences University of Surrey. [Electronic resource]. - Access mode: <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R.Webb/MDDP/2012/Report/3D%20Building%20Printer%20-%20Group%201.pdf>
3. Lipson H., Kurman M. (2013). Fabricated: The New World of 3D Printing. Indiana: Wiley.
4. Khoshnevis. B. (2004). Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. Automation in construction, 13(1). 5-19. <https://doi.org/10.1016/j>

5. Shatov S., Savytskyi M. & Marchenko I. (2019). Improvement of 3D printing object equipment. Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture. 1. 90-101. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261119.91.593>
6. Savytskyi N. V., Shatov S. V., Ozhyshchenko O. A. (2016). 3D-printing of build objects. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 3. 18-26.
7. Kuhudzai R.J. (2022). Apis Cor Is Ready to Scale Up The 3D-Printed Home & Building Sector With Its Advanced Compact Mobile Robot Tech. [Electronic resource]. - Access mode: <https://cleantechnica.com/2022/02/09/apis-cor-is-ready-to-scale-up-the-3d-printed-home-building-sector-with-its-advanced-compact-mobile-robot-tech/>
8. K. Mok. (2018). Huge Modular 3D Printer Creates \$1,000 Tiny House Out of Mud. [Electronic resource]. - Access mode: <https://www.treehugger.com/gaia-house-d-printed-out-mud-wasp-4857768>
9. Mobile complex of equipment for 3D printing / M. Nesterenko, O. Orysenko, I. Zhyla, D. Sidan // ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2023. – Т. 1 (60). – С. 12–18. – doi:<https://doi.org/10.26906/znp.2023.59.0000>
10. Лабораторний будівельний 3D принтер / М.М. Нестеренко, О.В. Орисенко, Д.О. Сідан, А.В. Шокало // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології та проблеми енергоефективності в промисловості і сільському господарстві (АКІТ-2022)», 10-11 листопада 2022 р. – Кропивницький : Ексклюзив-Систем, 2022. – С. 223–224.
11. Orysenko O. The analytical investigation of the concrete mixture deposition process by the concrete 3d printer extruder / O. Orysenko, M. Nesterenko, A. Shokalo // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво = Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering / голов. ред. С.Ф. Пічугін. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2022. – Вип. 2 (59). – С. 5–10. – <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.3093>
12. Orysenko O.V. Design of 3D printers analysis for construction and architecture / Oleksandr Orysenko, Mykola Nesterenko, Artem Shokalo, Tetiana Nesterenko // Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво = Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering / Нац. ун-т «Полтав. політехніка ім. Юрія Кондратюка». – Полтава : 2021. – Вип. 2 (57). – С. 105–110.

References:

1. Shatov, S.V., Savytskyi, N.V., & Karpushyn, S.A. (2017). Obobshcheniye innovatsionnykh tekhnologiy 3D-pechati stroitel'nykh ob'yektov dlya razrabotki startupov [Generalization of innovative technologies of 3D printing of construction objects for startup development]. Stroitel'stvo. Materialovedeniye. Mashinostroyeniye. Seriya: Sozdaniye vysokotekhnologicheskikh ekokompleksov v Ukraine na osnove kontseptsii sbalansirovannogo razvitiya, 99, 194–200.
2. Alwi, A., Karayiannis, S., Starkey, B., Gardner, M., Reodique, K., & Varley, Th. (2013). Construction: MegaScale 3D Printing. Group 1 Final Report. Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey. Retrieved from: <http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R.Webb/MDDP/2012/Report/3D%20Building%20Printer%20-%20Group%201.pdf>
3. Lipson, H., & Kurman, M. (2013). Fabricated: The New World of 3D Printing. Indiana: Wiley.
4. Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. Automation in Construction, 13(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j>
5. Shatov, S., Savytskyi, M., & Marchenko, I. (2019). Improvement of 3D printing object equipment. Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture, 1, 90–101. <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261119.91.593>
6. Savytskyi, N.V., Shatov, S.V., & Ozhyshchenko, O.A. (2016). 3D-printing of build objects. Visnyk Prydniprov'skoi Derzhavnoi Akademii Budivnytstva ta Arkhitektury [Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture], 3, 18–26.
7. Kuhudzai, R.J. (2022). Apis Cor is ready to scale up the 3D-printed home & building sector with its advanced compact mobile robot tech. Retrieved from: <https://cleantechnica.com/2022/02/09/apis-cor-is-ready-to-scale-up-the-3d-printed-home-building-sector-with-its-advanced-compact-mobile-robot-tech/>
8. Mok, K. (2018). Huge modular 3D printer creates \$1,000 tiny house out of mud. Retrieved from: <https://www.treehugger.com/gaia-house-d-printed-out-mud-wasp-4857768>

9. Nesterenko, M., Orysenko, O., Zhyla, I., & Sidan, D. (2023). Mobile complex of equipment for 3D printing. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(60), 12–18. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.59.0000>
10. Nesterenko, M.M., Orysenko, O.V., Sidan, D.O., & Shokalo, A.V. (2022). Laboratornyi budivelnyi 3D prynter [Laboratory construction 3D printer]. In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Automation, Computer-Integrated Technologies and Energy Efficiency Problems in Industry and Agriculture (AKIT-2022)”* (pp. 223–224). Kropyvnytskyi: Ekskliuzyv-System.
11. Orysenko, O., Nesterenko, M., & Shokalo, A. (2022). The analytical investigation of the concrete mixture deposition process by the concrete 3D printer extruder. *Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(59), 5–10. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.3093>
12. Orysenko, O.V., Nesterenko, M., Shokalo, A., & Nesterenko, T. (2021). Design of 3D printers analysis for construction and architecture. *Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 2(57), 105–110.

Технологія захисту навколишнього середовища

УДК 628.471:504:662.6

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0613>

¹Ірина Кордуба,

доктор технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465>, e-mail: uaror-korduba@ukr.net

¹Альона Перебинос,

кандидат технічних наук, асистент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0000-0003-0565-9413>, e-mail: perebynos.ar@knuba.edu.ua

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ МЕДИЧНИХ І ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ВІДХОДІВ

АНОТАЦІЯ. Пандемія COVID-19 та повномасштабна війна в Україні спричинили суттєве зростання обсягів і зміну морфологічного складу медичних відходів, що створює додаткові екологічні та санітарно-епідемічні ризики. Виникла потреба у формуванні національної стратегії управління медичними відходами в умовах надзвичайних ситуацій, здатної забезпечити стійкість системи охорони здоров'я. Традиційні технології, зокрема спалювання, не гарантують повної деструкції токсичних сполук і можуть спричинити вторинне забруднення довкілля. Відповідно до рекомендацій ВООЗ, безпечне спалювання можливе лише за температур понад 800 °С в основній камері та 1000 °С у камері допалювання, тоді як для повної деструкції органічних токсинів необхідні температури 1200–3000 °С, досяжні лише за умов плазмохімічної обробки. У роботі проаналізовано сучасні плазмохімічні технології оброблення відходів, що ґрунтуються на використанні електродугових плазмотронів із робочими температурами понад 2000 °С. Доведено, що такі технології забезпечують повну демоллекуляризацію токсичних сполук, зокрема полімерів і компонентів хімічної зброї, без утворення діоксинів і смол. У результаті процесу утворюються екологічно безпечні продукти – синтез-газ ($H_2 + CO$), придатний для подальшого енергетичного використання, та невелика кількість інертного шлаку, який може бути використаний у будівельній галузі. Розкрито конструктивні та експлуатаційні особливості плазмотронів різної потужності, що забезпечують стабільність дуги й тривалий термін служби електродів. Плазмохімічний метод має низку переваг: повне знищення токсичних компонентів, рекуперація енергоємного синтез-газу, високий коефіцієнт газифікації (93–95 %), зменшення обсягів відходів, енергозбереження та екологічна безпечність процесу. Порівняння демонструє, що плазмохімічні технології здатні ефективно переробляти навіть збільшені обсяги небезпечних відходів, мінімізуючи ризики для персоналу й населення, забезпечуючи екологічну безпеку та можливість вторинного використання утворених продуктів.

Ключові слова: медичні відходи, плазмохімічні технології, плазмодуговий метод, плазмотрон, синтез-газ, демоллекуляризація, оброблення відходів, видалення відходів, екологічна безпека.

APPLICATION OF PLASMA CHEMICAL METHODS FOR ENVIRONMENTALLY SAFE TREATMENT OF MEDICAL AND PHARMACEUTICAL WASTE

ABSTRACT. The COVID-19 pandemic and the full-scale war in Ukraine have caused a significant increase in the volume and change in the morphological composition of medical waste, which creates additional environmental and sanitary-epidemic risks. There is a need to develop a national strategy for managing medical waste in emergency situations, capable of ensuring the sustainability of the healthcare system. Traditional technologies, in particular incineration, do not guarantee complete destruction of toxic compounds and can cause secondary environmental pollution. According to WHO recommendations, safe incineration is possible only at temperatures above 800 °C in the main chamber and 1000 °C in the afterburning chamber, while for the complete destruction of organic toxins, temperatures of 1200–3000 °C are required, which are achievable only under plasma-chemical treatment conditions. The paper analyzes modern plasma-chemical waste treatment technologies based on the use of electric arc plasma torches with

operating temperatures above 2000 °C. It is proven that such technologies provide complete demolecularisation of toxic compounds, in particular polymers and components of chemical weapons, without the formation of dioxins and resins. The process results in environmentally safe products – synthesis gas ($H_2 + CO$), suitable for further energy use, and a small amount of inert slag, which can be used in the construction industry. The design and operational features of plasma torches of different powers, which ensure arc stability and long electrode service life, are disclosed. The plasma-chemical method has a number of advantages: complete destruction of toxic components, recovery of energy-intensive synthesis gas, high gasification coefficient (93–95%), reduction of waste volumes, energy saving and environmental safety of the process. The comparison demonstrates that plasma chemical technologies are capable of effectively processing even increased volumes of hazardous waste, minimising risks to personnel and the public, ensuring environmental safety and the possibility of secondary use of the products formed.

Keywords: medical waste, plasma chemical technologies, plasma arc method, plasmatron, synthesis gas, demolecularization, waste treatment, waste disposal, environmental safety.

1. Постановка проблеми. Відповідно до Закону України «Про управління відходами», відходи визначаються як будь-які речовини, матеріали або предмети, від яких їх власник позбувається, має намір чи зобов'язаний позбутися. Медичні відходи, у свою чергу, становлять відходи, що утворюються в результаті здійснення медичного обслуговування, ветеринарної практики, експертиз та досліджень у сфері охорони здоров'я й ветеринарної медицини, включно з науковими та дослідницькими роботами [1]. Зростання обсягів медичних відходів є глобальною тенденцією, що посилюється під впливом збройних конфліктів, пандемій, природних катастроф і криз у сфері охорони здоров'я. До складу таких відходів входять інфекційно небезпечні матеріали, хімічні речовини, фармацевтичні препарати, а також значна кількість одноразових виробів, які становлять потенційну загрозу для здоров'я населення та довкілля за відсутності належного управління.

У період пандемії COVID-19 (2020–2021 рр.) основними видами медичних відходів були використані засоби індивідуального захисту (маски, рукавички, халати, щитки для обличчя), одноразові тести (ПЛР, антигенні), шприци, флакони з вакциною, а також матеріали з пунктів тестування та вакцинації. До основних джерел утворення медичних відходів належали лікувальні заклади, що надавали допомогу пацієнтам із захворюванням на COVID-19. Згідно з оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), пандемія COVID-19 спричинила по світу значне зростання обсягів медичних відходів [2]. В Україні відповідно до звіту United Nations Development Programme (UNDP) та проєкту Ukraine-MEDWASTE зафіксовано суттєве збільшення обсягів медичних та інфекційних відходів під час пандемії, хоча точний множник приросту варіює через обмеженість даних [3, 4].

В Україні після початку широкомасштабних воєнних дій у лютому 2022 року відбулися зміни у структурі та джерелах утворення медичних відходів. Основними їх джерелами стали військові шпиталі та мобільні медичні пункти, у яких накопичуються кровозамінники, перев'язувальні матеріали, уламки хірургічних інструментів, лікарські засоби з простроченим терміном придатності або ті, що зберігалися з порушенням умов, а також засоби індивідуального захисту та забруднене обладнання, пошкоджене внаслідок бойових дій. З метою підвищення рівня безпеки управління медичними відходами в Україні 1 квітня 2025 року набув чинності наказ Міністерства охорони здоров'я України № 1827 від 31.10.2024 р., яким затверджено новий Порядок управління медичними відходами (ДСанПіН № 1827) [5]. Документ встановлює вимоги щодо їх утворення, збирання, зберігання, перевезення, оброблення та забезпечення безпеки для здоров'я людини і навколишнього середовища.

Особливої уваги потребують небезпечні відходи, що характеризуються фізичними, хімічними, біологічними чи іншими небезпечними властивостями, здатними завдати шкоди довкіллю та здоров'ю людини. Такі відходи вимагають застосування спеціальних методів і технологій управління. Серед найнебезпечніших видів відходів, що утворюються внаслідок людської діяльності, вирізняють хімічні та біологічні. Хімічні відходи є

небезпечними через високу токсичність і стійкість у навколишньому середовищі – вони повільно піддаються деградації та можуть накопичуватися у ґрунті, воді та живих організмах [6]. До цієї категорії належать органогалогенові сполуки, радіоактивні ізотопи металів, а також матеріали, забруднені токсичними хімічними речовинами. Біологічні відходи становлять ризик поширення патогенних мікроорганізмів, вірусів і токсинів, що зумовлює необхідність їх знешкодження у спеціалізованих умовах.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підтверджують ефективність плазмохімічних технологій у переробці різних видів відходів, включно з небезпечними медичними та фармацевтичними. Зокрема, плазмохімічний піроліз забезпечує глибоку деструкцію токсичних сполук, таких як полімери та компоненти хімічної зброї, завдяки високим температурам, що досягаються плазмовими дугами. У порівнянні з традиційними методами, плазмохімічні технології характеризуються високим коефіцієнтом газифікації (93–95 %), що дозволяє ефективно переробляти великі обсяги відходів. Зокрема, у кризових умовах, коли обсяги медичних відходів можуть суттєво зростати, ці технології зберігають ефективність. Плазмові методи також є екологічно прийнятними: вони забезпечують підтримку високих температур (1200–1400 °C і вище) та хімічної реактивності, що сприяє швидкій термічній обробці відходів [7-13]. Таким чином, сучасні наукові публікації підтверджують, що плазмохімічні технології є ефективними та безпечними для навколишнього середовища методами утилізації відходів, здатними забезпечувати стабільне управління навіть за змінних умов виробництва та надзвичайних ситуацій [14-15].

3. Метою роботи є комплексна оцінка ефективності, екологічної безпеки та техніко-економічних характеристик плазмохімічної утилізації медичних та фармацевтичних відходів, а також визначення переваг і обмежень застосування плазмодугових установок порівняно з традиційними методами обробки, такими як спалювання, автоклавування та хімічна нейтралізація.

4. Матеріали та методи. Об'єктом дослідження були медичні та фармацевтичні відходи, класифіковані відповідно до чинних санітарних норм та Національного переліку відходів України [5, 16]. Предметом дослідження – плазмохімічна обробка у вигляді термічного піролізу з використанням плазмодугових установок. Аналітичний підхід полягав у визначенні ступеня деструкції токсичних компонентів, коефіцієнта газифікації та оцінці екологічної безпеки процесу, що дозволяє порівняти плазмохімічні методи з традиційними способами обробки відходів.

5. Результати дослідження. Порівняння обсягів медичних відходів під час пандемії COVID-19 та у період війни в Україні демонструє дві масштабні кризи, які спричинили різке зростання кількості небезпечних медичних матеріалів, однак мають різну природу та структуру утворення відходів (табл. 1). Медичні відходи війни є складнішими за складом і небезпечнішими: вони поєднують біологічну, хімічну, токсикологічну та радіологічну загрозу. Багато з них утворюються в польових умовах без належної інфраструктури для збору та утилізації, що призводить до неконтрольованого розповсюдження збудників інфекцій, стійких до антибіотиків, а також забруднення ґрунтів і водоносних горизонтів токсичними речовинами. У районах активних бойових дій (Харківська, Донецька, Херсонська області) ситуація особливо критична. У 2023 році у цих областях обсяги медичних відходів збільшилися щонайменше в 4–5 разів у порівнянні з довоєнним періодом. За деякими даними, загальна кількість таких відходів в Україні могла перевищувати 10 000 тонн на рік, при цьому значна частина утворювалась у непристосованих умовах [3].

Порівнюючи біологічну небезпеку медичних відходів періоду COVID-19, воєнного та мирного часу, слід зазначити, хоча в усіх випадках існує ризик зараження, під час війни ці ризики доповнюються широким спектром хімічних забруднювачів. Наприклад, рештки медикаментів, хімічних реагентів і навіть уламки боєприпасів можуть мати канцерогенну або мутагенну дію. У той час як у період пандемії в Україні діяли централізовані системи контролю за поводженням з інфекційними відходами, зокрема на основі рекомендацій ВООЗ і МОЗ, у період війни багато таких систем виявилися паралізованими або недоступними.

Таблиця 1. Порівняння утворення медичних відходів в Україні під час пандемії COVID-19 і воєнного стану

Table 1. Comparison of medical waste generation in Ukraine during the COVID-19 pandemic and martial law

Показник	COVID-19	Війна в Україні
Джерело утворення	Лікарні, пункти вакцинації, лабораторії	Лікарні, військові госпіталі, мобільні пункти
Види відходів	Маски, тести, шприци, упаковка від вакцин	Кровозамінники, бинти, хірургічні інструменти, уламки, ліки
Орієнтовний обсяг	3 000–5 000 тон (2021)	8 000–12 000 тон (2023)
Характер	Масове інфекційне навантаження	Травматичне, змішане інфекційне та хімічне навантаження
Основні проблеми	Нестача утилізаційних потужностей	Відсутність безпечного збору та транспортування у зонах бойових дій

Джерела: Міністерство охорони здоров'я України. Аналітичні дані та звіти щодо утворення медичних відходів у лікарнях, пунктах вакцинації, військових госпіталях та мобільних пунктах, 2021–2023 рр.; власні розрахунки та узагальнення даних щодо видів та обсягів відходів у період пандемії COVID-19 та воєнних дій.

Оброблення медичних відходів в Україні в умовах повномасштабної війни стикається з низкою критичних викликів, особливо в прифронтових та тимчасово окупованих регіонах. Насамперед, у цих зонах фактично відсутня централізована система збирання, транспортування та безпечного видалення медичних відходів. Відходи часто залишаються без належного управління, захоронюються або спалюються у відкритих умовах без очищення викидів, що створює додаткову екологічну та епідеміологічну загрозу. Серйозною проблемою є пошкодження інфраструктури: зруйновані медичні заклади, лабораторії та підприємства з оброблення відходів не дозволяють дотримуватись стандартів безпеки. У багатьох громадах відсутня логістика або доступ до ліцензованих операторів, що унеможливує ефективне управління. Крім того, спостерігається гостра нестача обладнання – автоклавів, сучасних інсінераторів із фільтрами, систем сортування. Використовуються застарілі методи, які не відповідають вимогам екологічної та біобезпеки. Бойові дії спричиняють накопичення значних обсягів патогенних медичних відходів – перев'язувальні матеріали, шприци, ампули, залишки біологічних рідин. Зростання кількості поранень, ампутацій, переливань крові та оперативних втручань у польових умовах призводить до суттєвого збільшення обсягів інфікованих відходів, які становлять небезпеку для здоров'я населення та навколишнього середовища.

На сьогодні в Україні медичні відходи обробляються переважно такими способами: автоклавуванням при температурах 105 °C та 132 °C протягом 30 хв та 60 хв відповідно, а також спалюванням в інсінераторах при температурному діапазоні 800–1200 °C (табл. 2). Ці методи забезпечують знищення інфекційних агентів і безпечне поводження з небезпечними матеріалами. Згадані методи відрізняються за технологічними параметрами, рівнем ефективності знезараження, енергоспоживанням та впливом на довкілля. Порівняння дозволяє визначити оптимальний спосіб оброблення відходів залежно від їх типу, обсягу та наявних технічних можливостей [17].

Автоклавування дозволяє ефективно знезаражувати більшість інфекційних відходів, роблячи безпечними для подальшого оброблення. Спалювання при низьких температурах, нижче 800 °C, не забезпечує повного знищення токсичних речовин і може спричинити утворення діоксинів. ВООЗ не рекомендує спалювати медичні відходи при таких температурах, а радить проводити видалення за температури не нижче 1100 °C, що гарантує повне розкладання шкідливих сполук. В Україні лише частина інсінераторів відповідає цим

вимогам, тому дедалі більшої популярності набувають альтернативні технології знезараження, такі як плазмова обробка [18]. Тому, підвищення уваги до цієї проблеми полягає у необхідності впровадження інноваційних технологій оброблення — піролізі, плазмової газифікації, багатостадійної хімічної нейтралізації, автоклавування з хімічними реагентами, фотокаталітичної обробки. Такі методи дозволяють одночасно знешкоджувати як хімічні, так і біологічні компоненти медичних відходів, зменшуючи викиди небезпечних речовин та знижуючи ризики для населення.

Таблиця 2. Методи оброблення медичних відходів в Україні

Table 2. Medical waste treatment methods in Ukraine

Метод	Суть процесу	Переваги	Недоліки	Особливості застосування
Автоклавування при $t \geq 105^\circ\text{C}$ (30 хв)	Стерилізація водяною парою при підвищеному тиску. Знищення бактерій, вірусів, спор. Часто доповнюється подрібненням відходів.	– Відсутність токсичних викидів. – Низькі витрати енергії. – Підходить для більшості інфекційних відходів.	– Не руйнує хімічні та фармацевтичні речовини. – Не зменшує об'єм так сильно, як спалювання. – Не застосовується для анатомічних або патологоанатомічних відходів.	Застосовується для інфекційних відходів (код 18 01 03*), перев'язувальних матеріалів, шприців, рукавичок. Не для токсичних або анатомічних компонентів.
Автоклавування при $t \geq 132^\circ\text{C}$ (60 хв)	Аналогічно до попереднього, але з вищою температурою та тривалістю стерилізації для знищення пріонів (дуже стійких патогенів).	– Єдиний неінсинераційний метод для знешкодження пріонів. – Екологічний, без токсичних газів.	– Потребує спеціального обладнання. – Високе енергоспоживання. – Також неефективний для хімічних відходів.	Застосовується для матеріалів, які могли бути контаміновані пріонами (нейрохірургія, лабораторії). Дуже обмежене використання.
Інсинерація (спалювання при $t 800\text{--}1200^\circ\text{C}$)	Повне згоряння відходів у спеціальних печах з високою температурою. Знищує органіку, патогени, фармацевтичні речовини.	– Повне знищення всіх патогенів. – Зменшення об'єму відходів до 5–10%. – Універсальний метод для будь-яких категорій медичних відходів.	– Можливе утворення токсичних викидів (діоксини, метали). – Висока вартість обладнання. – Потреба у фільтрах і контролі викидів.	Ефективний для всіх типів медичних відходів, включно з анатомічними, фармацевтичними, лабораторними. Часто використовується в зонах бойових дій, за умови наявності мобільних або стаціонарних установок.

Останні два десятиліття плазмохімічні методи з температурами до $10\,000^\circ\text{C}$ досліджуються для знищення небезпечних речовин та промислових відходів, включаючи полімери та компоненти хімічної зброї. Вони забезпечують повну демоллекуляризацію при температурах вище 1200°C , без утворення смол і діоксинів, розкладаючи відходи на безпечні сполуки: водень, монооксид вуглецю та незначну частку твердого шлаку (до 7 % маси). Плазмохімічні технології зменшують викиди токсинів на 99 %, а синтез-газ ($\text{H}_2 + \text{CO}$) і шлак використовуються для енергії чи будівництва (табл. 3). Процес відбувається без кисню, що

виключає утворення оксидів азоту. Парова плазма забезпечує контрольовану переробку відходів будь-якого складу, а гідрозатор ізолює реактор від атмосфери [12].

Плазмовий дуговий метод має низку суттєвих переваг порівняно з традиційними технологіями оброблення медичних і фармацевтичних відходів. До них належать: забезпечення високотемпературного знешкодження більшості токсичних сполук; можливість рекуперації утвореного синтез-газу, що містить до 40–50 % енергії у вигляді оксиду вуглецю (CO) та водню (H₂), що сприяє формуванню замкнених екологічно безпечних циклів; досягнення високого коефіцієнта газифікації (93–95 %) з одночасним зменшенням енергоспоживання до 40 % та скороченням об'єму відходів у 300–400 разів. Крім того, технологія дає змогу спростити процеси попереднього сортування та сушіння відходів, а також запобігає утворенню високотоксичних діоксинів у присутності хлорвмісних сполук завдяки плазмовому впливу при температурах понад 2000 °C [19, 20].

Таблиця 3. Порівняння методів оброблення медичних відходів
Table 3. Comparison of medical waste treatment methods

Критерій	Плазмові дугові технології	Традиційні методи видалення (спалювання / захоронення)
<i>Знищення токсичних речовин</i>	Здатність знищувати практично всі токсичні речовини завдяки високотемпературному впливу (>3000 °C).	Обмежена здатність, утворення вторинних токсичних сполук (діоксини).
<i>Енергетична ефективність</i>	Рекуперація синтез-газу (CO, H ₂) з високим енергетичним потенціалом, економія до 40 % електроенергії.	Низька або відсутня рекуперація енергії, високе енергоспоживання.
<i>Коефіцієнт газифікації</i>	93–95 % та зменшення об'єму відходів у 300–400 разів.	Низький, значний залишковий об'єм відходів.
<i>Попередня підготовка відходів</i>	Спрощене сортування та сушіння, але потрібне попереднє подрібнення.	Складне сортування, сушіння та підготовка відходів.
<i>Екологічність</i>	Мінімальний рівень NO _x , SO _x , CO ₂ ; запобігання утворенню діоксинів; мінімальні зольно-пилові викиди.	Високий рівень викидів NO _x , SO _x , CO ₂ , утворення діоксинів.
<i>Відходи після оброблення</i>	Практично безвідходний цикл, радикальне розщеплення органічних сполук.	Значна кількість золи, шлаків, вторинних відходів.
<i>Енергоспоживання</i>	Зовнішнє електроспоживання, але економія > 40 % за рахунок рекуперації теплової енергії.	Високе енергоспоживання без значної рекуперації.
<i>Технологічна складність</i>	Вимагає подрібнення відходів і складного обладнання для плазмового впливу.	Простіші технології, але менш ефективні.

Незважаючи на високу ефективність та екологічну безпечність, плазмовий електродуговий метод поки не набув широкого практичного застосування. Основними стримувальними чинниками залишаються висока вартість обладнання та конструкційна складність плазмотронів. Водночас сучасні розробки плазмотронів постійного й змінного струму характеризуються підвищеним ресурсом роботи електродів, спрощеним керуванням та обслуговуванням, що створює передумови для ширшого впровадження цієї технології. Високі енергетичні витрати плазмохімічного процесу можуть бути частково компенсовані за рахунок повторного використання теплової енергії, що накопичується у відходах, для потреб

самої установки. Такий підхід підвищує екологічну та енергетичну ефективність плазмохімічних систем, а також зменшує ризики утворення та викидів токсичних сполук, зокрема діоксинів, фуранів і поліхлорованих біфенілів, у навколишнє середовище.

6. Висновки. 1. Пандемія COVID-19 та повномасштабна війна в Україні зумовили суттєве зростання обсягів і зміну морфологічного складу медичних відходів, що створює додаткові екологічні та санітарні ризики.

2. Виявлено потребу у формуванні національної стратегії управління медичними відходами в умовах надзвичайних ситуацій, яка враховуватиме специфіку кризових періодів і забезпечуватиме стійкість системи охорони здоров'я.

3. На сьогодні більшість традиційних технологій оброблення медичних і фармацевтичних відходів, зокрема спалювання, не гарантують повної деструкції токсичних сполук і можуть спричиняти вторинне забруднення довкілля токсичними залишками. Відповідно до рекомендацій ВООЗ, безпечне спалювання медичних відходів можливе лише за температур вище 800 °С в основній камері та понад 1000 °С у камері допалювання, що потребує використання високотемпературних технологій.

4. Для повної молекулярної деструкції небезпечних органічних сполук у складі медичних і фармацевтичних відходів необхідні температури 1200–3000 °С, які можуть бути досягнуті лише за допомогою плазмохімічних технологій.

5. Плазмохімічна обробка відходів є перспективним напрямом розвитку системи екологічно безпечного управління медичними відходами, здатним забезпечити високий рівень знезараження та мінімізацію утворення вторинних токсичних продуктів.

6. Водночас плазмові технології залишаються переважно на стадії науково-експериментальних розробок і потребують подальших досліджень для оптимізації енергоспоживання, зниження вартості обладнання та масштабування у промислових умовах.

Список використаних джерел:

1. Про управління відходами : Закон України від 20 черв. 2022 р. № 2320-IX // Відомості Верховної Ради України. – 2023. – № 4. – Ст. 30. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 28.10.2025).
2. World Health Organisation. (2022, February 1). *Tonnes of COVID-19 health care waste expose urgent need to improve waste management systems*. <https://www.who.int/news/item/01-02-2022-tonnes-of-covid-19-health-care-waste-expose-urgent-need-to-improve-waste-management-systems>
3. Україна. ПРООН. (2023). Моніторинг бар'єрів та прогалин на шляху до сталого поводження з медичними відходами в закладах охорони здоров'я України.
4. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU). (2024). *Medical Waste in Ukraine (Ukraine-MEDWASTE): A pilot project K-Z391-ST02* [PDF]. Hamburg. https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-38663_01-Hauptbericht.pdf
5. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Порядок управління медичними відходами, у тому числі вимоги щодо безпечності для здоров'я людини під час утворення, збирання, зберігання, перевезення, оброблення таких відходів» : наказ Міністерства охорони здоров'я України від 31 жовтня 2024 р. № 1827 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1938-24#Text>.
6. Вовк О. О., Бойченко М. С. Причинно-наслідковий аналіз стану екологічної безпеки під час виробництва та використання фармацевтичної продукції // Наукоємні технології. – 2017. – № 1. – С. 71–77.
7. Jie, Z., Liu, C., Xia, D., & Zhang, G. (2023). An atmospheric microwave plasma-based distributed system for medical waste treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 51314-51326.
8. Rutberg, P. G., Bratsev, A. N., Safronov, A. A., Surov, A. V., & Schegolev, V. V. (2003). The technology and execution of plasmachemical disinfection of hazardous medical waste. *IEEE transactions on plasma science*, 30(4), 1445–1448.
9. Unnisa, S. A., & Hassanpour, M. (2017). Plasma technology and waste management. *Resource Recycling Waste Management*, 1, 1–3.

10. Giakoumakis, G., Politi, D., & Sidiras, D. (2021). Medical waste treatment technologies for energy, fuels, and materials production: A review. *Energies*, 14(23), 8065.
11. Cai, X., & Du, C. (2021). Thermal plasma treatment of medical waste. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41(1), 1–46.
12. Nema, S. K., & Ganeshprasad, K. S. (2002). Plasma pyrolysis of medical waste. *Current science*, 271–278.
13. Kaushal, R., Rohit, & Dhaka, A. K. (2024). A comprehensive review of the application of plasma gasification technology in circumventing the medical waste in a post-COVID-19 scenario. *Biomass conversion and biorefinery*, 14(2), 1427–1442.
14. Galaly, A. R. (2022). Sustainable development solutions for the medical waste problem using thermal plasmas. *Sustainability*, 14(17), 11045.
15. Shi, H. Y., & Wang, P. Y. (2025). Thermal Plasma Medical Waste Treatment: Data-ML Driven System Performance and Product Prediction. *Waste and Biomass Valorization*, 16(1), 299–317.
16. Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів : Постанова Каб. Міністрів України від 24.03.2023 № 1102. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 28.10.2025).
17. Popovych, O., Vronska, N., Yatchyshyn, Y., & Zaharko, Y. (2020). Handling the pharmaceutical industry waste in Ukraine and the UA. *Environmental Problems*, 1 (5), 2020, 5(1), 50–57.
18. World Health Organisation. (2010). Exposure to dioxins and dioxin-like substances: a major public health concern. WHO: Geneva, Switzerland.
19. Ващенко, В., Кордуба, І., Ненсі Махмуд, Х. ., & Негода, Н. (2024). Технологічні та екологічні особливості установок для плазмохімічного піролізу медичних відходів. *Техніка будівництва*, (40), 93–108. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0310>
20. Zhovtianskyi V.A. Petrov S.V. Orlyk V.M. Yakymovych M.V. Vakilov I.M. Nazarenko V.G. Vabishchevych M.S. Voloshyniuk I.M. Yakubushyn Y.A., et al. Recycling of hazardous and radioactive waste using plasma technologies, – *Ecological Sciences*, – 2018, – No. 2 (21), – pp. 49–58.

References:

1. Pro upravlinnia vidkhodamy : Zakon Ukrainy vid 20 cherv. 2022 r. № 2320-IX // Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. – 2023. – № 4. – St. 30. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (data zvernennia: 28.10.2025). {In Ukrainian}.
2. World Health Organisation. (2022, February 1). *Tonnes of COVID-19 health care waste expose urgent need to improve waste management systems*. <https://www.who.int/news/item/01-02-2022-tonnes-of-covid-19-health-care-waste-expose-urgent-need-to-improve-waste-management-systems>
3. Ukraina. PROON. (2023). Monitorynh bar'ieriv ta prohalyh na shliakhu do staloho povodzhennia z medychnymy vidkhodamy v zakladakh okhorony zdorov'ia Ukrainy. {In Ukrainian}.
4. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU). (2024). *Medical Waste in Ukraine (Ukraine-MEDWASTE): A pilot project K-Z391-ST02* [PDF]. Hamburg. https://opac.dbu.de/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-38663_01-Hauptbericht.pdf
5. Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl «Poriadok upravlinnia medychnymy vidkhodamy, u tomu chysli vymohy shchodo bezpechnosti dlia zdorov'ia liudyny pid chas utvorennia, zbyrannia, zberihannia, perevezennia, obroblennia takykh vidkhodiv» : nakaz Ministerstva okhorony zdorov'ia Ukrainy vid 31 zhovtnia 2024 r. № 1827 // Baza danykh «Zakonodavstvo Ukrainy» / Verkhovna Rada Ukrainy. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1938-24#Text> (data zvernennia: 28.10.2025). {In Ukrainian}.
6. Vovk O. O., Boichenko M. S. Prychynno-naslidkovyi analiz stanu ekolohichnoi bezpeky pid chas vyrobnytstva ta vykorystannia farmatsevychnoi produktsii // Naukoiemni tekhnolohii. – 2017. – № 1. – S. 71–77. {In Ukrainian}.
7. Jie, Z., Liu, C., Xia, D., & Zhang, G. (2023). An atmospheric microwave plasma-based distributed system for medical waste treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(17), 51314–51326.
8. Rutberg, P. G., Bratsev, A. N., Safronov, A. A., Surov, A. V., & Schegolev, V. V. (2003). The technology and execution of plasmachemical disinfection of hazardous medical waste. *IEEE transactions on plasma science*, 30(4), 1445–1448.
9. Unnisa, S. A., & Hassanpour, M. (2017). Plasma technology and waste management. *Resource Recycling Waste Management*, 1, 1–3.
10. Giakoumakis, G., Politi, D., & Sidiras, D. (2021). Medical waste treatment technologies for energy, fuels, and materials production: A review. *Energies*, 14(23), 8065.

11. Cai, X., & Du, C. (2021). Thermal plasma treatment of medical waste. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41(1), 1-46.
12. Nema, S. K., & Ganeshprasad, K. S. (2002). Plasma pyrolysis of medical waste. *Current science*, 271-278.
13. Kaushal, R., Rohit, & Dhaka, A. K. (2024). A comprehensive review of the application of plasma gasification technology in circumventing the medical waste in a post-COVID-19 scenario. *Biomass conversion and biorefinery*, 14(2), 1427-1442.
14. Galaly, A. R. (2022). Sustainable development solutions for the medical waste problem using thermal plasmas. *Sustainability*, 14(17), 11045.
15. Shi, H. Y., & Wang, P. Y. (2025). Thermal Plasma Medical Waste Treatment: Data-ML Driven System Performance and Product Prediction. *Waste and Biomass Valorization*, 16(1), 299-317.
16. Pro zatverdzhennia Poriadku klasyfikatsii vidkhodiv ta Natsionalnoho pereliku vidkhodiv : Postanova Kab. Ministriv Ukrainy vid 24.03.2023 № 1102. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1102-2023-%D0%BF#Text> (data zvernennia: 28.10.2025). {In Ukrainian}.
17. Popovych, O., Vronska, N., Yatchyshyn, Y., & Zaharko, Y. (2020). Handling the pharmaceutical industry waste in Ukraine and the UA. *Environmental Problems*, 1 (5), 2020, 5(1), 50-57.
18. World Health Organisation. (2010). Exposure to dioxins and dioxin-like substances: a major public health concern. WHO: Geneva, Switzerland.
19. Vashchenko, V., Korduba, I., Nensi Makhmud, Kh., & Nehoda, N. (2024). Tekhnolohichni ta ekolohichni osoblyvosti ustanovok dlia plazmokhimichnoho pirolizu medychnykh vidkhodiv. *Tekhnika budivnytstva*, (40), 93–108. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0310> {In Ukrainian}.
20. Zhovtianskyi V.A. Petrov S.V. Orlyk V.M. Yakymovych M.V. Vakilov I.M. Nazarenko V.G. Vabishchevych M.S. Voloshyniuk I.M. Yakubyshyn Y.A., et al. Recycling of hazardous and radioactive waste using plasma technologies, - *Ecological Sciences*, – 2018, – No. 2 (21), – pp. 49–58.

УДК 620.9:504

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0614>**¹Роман Гамоцький,**аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці,
<https://orcid.org/0000-0002-5469-8606>, e-mail: roman.hamotskyi@gmail.com¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ТА ГРОМАД ПІД ЧАС ВІЙНИ

АНОТАЦІЯ. Стаття присвячена комплексному аналізу технічних рішень щодо забезпечення енергетичної стійкості міських будівель і громад України в умовах війни. Значна увага приділяється трансформації енергетичної інфраструктури з урахуванням збереження довкілля. Проаналізовано структуру сучасних систем енергозабезпечення з урахуванням ризиків порушення централізованих енергопостачальних мереж. Аналіз технічних рішень енергозабезпечення відображає не лише структуру взаємодії різних технологій, а й принцип адаптивного управління, що дозволяє забезпечити енергетичну стійкість, безперервність критичних функцій та мінімізацію витрат у надзвичайних умовах. Розроблено узагальнену схему інтеграції до систем централізованого енерго- та теплопостачання джерел, що включають сонячні фотоелектричні установки, вітрові мікротурбіни, комбіноване виробництво тепла та електроенергії, геотермальні теплові насоси, біомасові системи, водневі паливні елементи та системи накопичення енергії. Використання багатокритеріального аналізу рішень дозволяє системно зіставити та оцінити сучасні технологічні альтернативи з огляду не лише на їх енергетичну ефективність та економічну доцільність, але й з урахуванням вимог екологічної безпеки.

Показано, що застосування такої матриці в рамках концепції осередкових енергомереж (CEN) дає можливість громадам формувати поетапні стратегії переходу до децентралізованої, низьковуглецевої та стійкої енергосистеми. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні локальних стратегій відновлення енергосистем і підвищення автономності міських будівель під час кризових ситуацій.

Ключові слова: енергетична стійкість, децентралізація енергозабезпечення, багатоповерхові будівлі, відновлювані джерела енергії, розумні системи управління, багатокритеріальний аналіз рішень, екологічна безпека.

TECHNICAL SOLUTIONS FOR ENSURING THE ENERGY RESILIENCE OF BUILDINGS AND COMMUNITIES DURING WARTIME

ABSTRACT. The article is devoted to a comprehensive analysis of technical solutions for ensuring the energy resilience of urban buildings and communities in Ukraine under wartime conditions. Considerable attention is paid to the transformation of the energy infrastructure with regard to environmental protection. The structure of modern energy supply systems is analysed, taking into account the risks of disruptions to centralised energy networks. The analysis of technical energy supply solutions reflects not only the interaction structure of different technologies, but also the principle of adaptive management, which makes it possible to ensure energy resilience, continuity of critical functions and cost minimisation in emergency conditions. A general scheme has been developed for integrating into centralised power and heat supply systems such sources as solar photovoltaic installations, wind microturbines, combined heat and power generation, geothermal heat pumps, biomass systems, hydrogen fuel cells and energy storage systems. The use of Multiple Criteria Decision Analysis makes it possible to systematically compare and assess modern technological alternatives not only in terms of their energy efficiency and economic feasibility, but also taking into account environmental safety requirements.

It is shown that the application of such a matrix within the framework of the cell energy network (CEN) concept enables communities to develop step-by-step strategies for transitioning to a decentralised, low-carbon and resilient energy system. The results of the study can be used in developing local strategies for restoring energy systems and increasing the autonomy of urban buildings during crisis situations.

Keywords: energy resilience, decentralization of energy supply, high-rise buildings, renewable energy sources, smart control systems, multi-criteria decision analysis, environmental safety.

1. Постановка проблеми. Одним із ключових викликів української енергетики є забезпечення стабільного енергопостачання в умовах постійних військових загроз, цілеспрямованих атак на генерувальні об'єкти й мережеву інфраструктуру, що призводить до перебоїв електро- та теплопостачання для громад. Водночас воєнні дії поглиблюють екологічні ризики, зумовлюючи зростання викидів забруднюючих речовин, деградацію водних і земельних ресурсів та підрив екологічної безпеки. Це посилює потребу переходу до стійкої, децентралізованої моделі енергетики на основі відновлюваних джерел енергії, мікромереж, систем накопичення та гнучкого управління попиту, здатних підтримувати роботу критичної інфраструктури в кризових умовах [1]. Однак наявні підходи до планування та оцінювання технічних рішень залишаються фрагментарними, здебільшого зосередженими на економічних показниках або окремих технологіях, без урахування повного спектра військових, екологічних, технічних і соціальних факторів на рівні конкретних громад. Відсутність комплексних методик, що інтегрують критерії енергетичної, екологічної та соціальної стійкості, ускладнює прийняття обґрунтованих рішень щодо вибору конфігурацій локальних енергосистем і їх інтеграції з національною та європейською інфраструктурою. Розробка структурованої моделі вибору технічних рішень із використанням багатокритеріального аналізу (MCDA) дозволить поєднати цілі енергетичної безпеки, екологічної сталості та захищеності населення в єдиному науково-методичному інструментарії, забезпечуючи підґрунтя для прийняття раціональних управлінських рішень у сфері відновлення та модернізації енергетики громад.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міжнародні та вітчизняні дослідження підкреслюють, що війна проти України трансформувала енергетичну сферу в систему постійних ризиків, де цілеспрямовані удари по генерувальних об'єктах та мережах призводять до хронічної нестабільності енергопостачання та підвищення екологічних загроз. У роботах R. Liu, S. Krivtsov та звітах Європейської Комісії наголошується, що атаки на теплові, атомні, гідроелектростанції й критичні елементи мереж супроводжуються зростанням токсичних викидів, деградацією водних і земельних ресурсів, що вимагає поєднання підходів енергетичної безпеки та екологічної політики [2, 3]. У працях J. Brown, A. Chernyak, O. Yatsyshin обґрунтовано, що підвищення стійкості енергетики можливе лише за умови системного врахування захищеності споживачів, безперервності електропостачання, використання «зелених» технологій і продуманого управління наслідками аварій, а не через локальні або одновимірні рішення [4–6]. Автори підкреслюють важливість багатокритеріального підходу до оцінки технічних рішень, де поряд з економічними показниками враховуються стійкість у кризових сценаріях, екологічний вплив, раціональність впровадження та довгострокова ефективність, оскільки технології, ефективні у звичайних умовах, можуть виявитися нежиттєздатними в умовах масових відключень чи руйнування інфраструктури.

Суттєву увагу в сучасних дослідженнях приділено ролі децентралізації та відновлюваних джерел енергії для підвищення стійкості громад – аналіз потенціалу дахових PV-систем в Україні, впровадження мікромереж, інтеграція систем накопичення енергії розглядаються як ключові умови формування гнучких локальних енергосистем. Роботи Winkler et al., та V. Oleksiuk показують, що розподілена генерація у поєднанні з підтримкою муніципалітетів і стабільною регуляторною базою створює можливості для локальної енергетичної автономії та швидкого реагування на удари по мережі, одночасно сприяючи досягненню кліматичних цілей [7–8]. Дослідження з питань smart grid, планування та оперативного керування енергосистемами акцентують на необхідності узгоджених метрик стійкості та рішень, які охоплюють увесь ланцюг – від генерації до кінцевого споживача, що формує наукове підґрунтя для комплексних моделей оцінки енергетичної стійкості громад.

Попри значний обсяг праць, що описують окремі технології, політичні рамки чи кейси громад, зберігається дефіцит інтегрованих методичних підходів до вибору технічних рішень для енергетичної та екологічної стійкості в умовах війни. Потребує подальшого розвитку єдина структурована модель, яка б поєднувала міжнародний досвід, національні стратегічні

цілі та локальні особливості громад, використовуючи інструменти MCDA для комплексної оцінки альтернатив із урахуванням військових ризиків, екологічних наслідків і соціальної вразливості населення. Це формує наукову нішу для розробки підходу, що дозволить системно інтегрувати енергетичні та екологічні рішення в муніципальне планування та практику відновлення інфраструктури в Україні.

3. Мета роботи. Обґрунтувати матрицю вибору технічних рішень щодо енергозабезпечення будівель, яка інтегрує екологічні, енергоефективні, соціальні та управлінські критерії в процес реконструкції та відновлення житлового фонду України.

4. Матеріали та методи. Для формування інтегрованої моделі вибору технічних рішень енергозабезпечення громад проаналізовано статистичні звіти Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, НКРЕКП, відкриті дані операторів систем розподілу, муніципальні енергетичні плани та кейси впровадження локальних енергетичних рішень у громадах. У дослідженні використано також інформацію з відкритих наукових публікацій, звіти European Commission Joint Research Centre [9], International Energy Agency (IEA) [10], IEA-PVPS [11], International Renewable Energy Agency (IRENA) [12], Hydrogen Europe [13], матеріали MDPI та аналітичні бази щодо світових цін на енергоресурси. На основі цих джерел сформовано репрезентативні сценарії для типових будівель і громад з різним рівнем доступу до енергоресурсів та різним ступенем пошкодження інфраструктури, у тому числі з урахуванням досвіду функціонування осередкових енергомереж в умовах дефіциту основних джерел живлення.

Для вибору найбільш доцільних технічних рішень застосовано метод системного аналізу в поєднанні з багатокритеріальним аналізом рішень (Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA) у формі зваженої суми (Weighted Sum Model, WSM). Кожна альтернатива оцінюється за набором критеріїв за п'ятибальною шкалою, після чого бали нормалізуються та множаться на вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети воєнного часу (підвищена вага стійкості, резервування та екологічної безпеки) [14]. Таким чином, загальна оцінка альтернативи отримується за базовою формулою MCDA:

$$TotalScore_i = \sum_{j=1}^n S_{ij}, \quad (1)$$

де S_{ij} – оцінка рішення i за критерієм j за шкалою від 1 до 5; n – кількість критеріїв оцінки.

Підсумковий інтегральний показник формується як сума зважених нормалізованих оцінок, що дає змогу ранжувати альтернативи та обирати сценарії з найкращим поєднанням факторів.

Для пріоритезації окремих критеріїв (наприклад, стійкості під час війни) використовується зважена формула оцінювання (Weighted Sum Model, WSM):

$$WeightedScore_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot S_{ij}, \quad (2)$$

де w_j – вага критерію j , причому сума всіх ваг дорівнює 1.

Наприклад: енергоефективність – 20%, екологічність – 20%, економічна ефективність – 10%, стійкість – 25%, сталість – 15%, масштабованість – 10%. Щоб нормалізувати різні діапазони оцінок всіх критеріїв (від 0 до 1), здійснюється додатковий крок:

$$S_{ij}^{norm} = \frac{S_{ij} - S_j^{\min}}{S_j^{\max} - S_j^{\min}}, \quad (3)$$

де S_{ij}^{norm} – нормалізований показник альтернативи i за критерієм j ; S_{ij} – фактичне значення показника; S_j^{max} , S_j^{min} – максимальне та мінімальне значення показника за критерієм j серед усіх альтернатив.

5. Результати дослідження. Джерела енергії поділяють на відновлювані та невідновлювані залежно від їхнього походження та здатності до відновлення в природі. Відновлювана енергія надходить із практично невичерпних ресурсів (сонце, вітер, геотермальна, гідроенергія, біомаса, біогаз), тоді як невідновлювані джерела включають викопне паливо – нафту, газ і вугілля. Використання відновлюваних джерел підвищує енергонезалежність України та рівень екологічної безпеки, хоча потребує значних початкових інвестицій і врахування просторових обмежень, особливо в містах. До повномасштабного вторгнення їхня частка в енергобалансі України перевищувала 10%, а до 2040 року прогнозується зростання до приблизно 28–50% виробництва.

Потенціал використання різного роду енергії, базується на сукупності різноманітних технічних рішень, що забезпечують енергопостачання за аварійних відключень. Серед них можна виділити найбільш популярні:

- підключення до мережі (національне електропостачання);
- сонячні фотоелектричні системи (Photovoltaic, PV);
- вітрові мікротурбіни (міський масштаб);
- комбіноване виробництво тепла й електроенергії (Combined Heat and Power, CHP);
- геотермальні теплові насоси;
- біомасові системи опалення;
- дизельні генератори (резервне живлення);
- системи накопичення енергії на основі акумуляторів (Battery Energy Storage Systems, BESS);
- водневі паливні елементи;
- централізоване теплопостачання (у тому числі з відновлюваних джерел);
- інтеграція «розумних мереж» та управління попитом.

Орієнтовне порівняння 11 основних технічних рішень для України здійснено на основі кількісних даних з відкритих джерел (Таблиця 1), однак в остаточних проєктних розрахунках слід враховувати велику кількість змінних факторів: локальні особливості проєктів, їх масштаб, мережеві умови, субсидії, доступ до палива і компонентів, мінливість цін у воєнний час, тощо. Попередні результати порівняння свідчать про значну різницю між капітальними витратами (CAPEX), експлуатаційними витратами (O&M), собівартістю виробленої енергії (LCOE) та коефіцієнтом використання встановленої потужності (CF).

Особливу роль у сучасних сценаріях енергостійкості відіграють системи накопичення енергії (BESS) та інтегровані рішення «розумних мереж» (Smart-grid), які у поєднанні з фотоелектричними станціями (PV) та технологіями управління попитом (DSM) дають можливість значно знизити потребу у дизельних генераторах і, відповідно, зменшити загальну собівартість автономного чи резервного енергопостачання. Навіть за умов високих початкових витрат на PV та BESS, у більшості сценаріїв ці рішення є економічно вигіднішими за дизельні установки, якщо йдеться про часте використання. Це підтверджується й національними рекомендаціями щодо впровадження систем накопичення енергії [15] (Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України).

У той же час, слід враховувати обмеження воєнного часу, оскільки доступність обладнання, проблеми з логістикою та високі ризики пошкодження інфраструктури безпосередньо впливають на CAPEX та реальний строк служби обладнання. Тому для повноцінного аналізу необхідно враховувати не лише цінові параметри, але й фактори, що мають визначальне значення у кризових умовах – надійність, мобільність та швидкість розгортання систем. Виходячи з цього, доцільно рекомендувати для швидкого підвищення енергетичної стійкості громад першочергову комбінацію розподілених PV, систем

накопичення BESS та управління попитом (DSM, smart-controls). Дизельні генератори слід залишати як резервне рішення лише для критичних випадків. Для великих об'єктів із потребами у теплопостачанні ефективними залишаються системи комбінованого виробництва тепла й електроенергії (CHP) за наявності доступного газу чи біомаси, а також централізоване теплопостачання з використанням відновлюваних джерел енергії, що дозволяє знизити рівень витрат на тепло (LCOH).

Таблиця 1. Орієнтовне порівняння технічних рішень забезпечення енергетичної стійкості
Table 1. Approximate comparison of technical solutions for ensuring energy resilience

Технології	Капітальні витрати на встановлену потужність (CAPEX, тис.грн/кВт)	Щорічні експлуатаційні та технічні витрати (%CAPEX/рік)	Коефіцієнт використання встановленої потужності (CF, %)	Орієнтовна собівартість електроенергії (LCOE, тис.грн/МВт)	Життєвий цикл (роки)
Підключення до мережі	~21	1–2%	50–60	1,68-2,52	–
Сонячні фотоелектричні системи	29,4-42	1–2%	12–15	2,31-2,94	25–30
Вітрові мікротурбіни	63-105	2–3%	20–25	3,78-5,04	20–25
Комбіноване виробництво тепла і електроенергії	50,4-84	4–6%	70–80	2,1-3,36	20–25
Геотермальні теплові насоси	50,4-84	2–3%	–	~1,68-2,52	20–25
Біоенергетичні системи опалення	33,6-63	3–5%	70–80	1,68-2,73	15–20
Дизельні генератори	12,6-25,2	10–15%	15–20	6,3-10,5	5–10
Системи накопичення енергії	14,7-21	1–2%	–	6,3-10,5	10–15
Водневі паливні елементи	126-210	3–5%	40–50	8,4-16,8	10–15
Централізоване теплопостачання (з ВДЕ)	21-50,4	3–4%	50–70	1,68-2,94	25–30
«Розумні» мережі управління попитом	+5-15%	1–2%	–	–	20–25

Примітка: Підключення до стаціонарної мережі визначено як умовні витрати на інфраструктуру/резервні підключення; витрати на управління попитом за допомогою систем «розумних» мереж оцінено як додаткові до інших технологій; в містах показники встановленої потужності для вітрових мікротурбін нижче; термін служби для систем накопичення енергії залежить від кількості циклів і вартості заряджання; потужності геотермальних теплових насосів та централізованого теплопостачання оцінено в кіловат або мегават-годинах теплової енергії.

Джерело: розроблено автором на основі даних з відкритих джерел Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України [15], Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) [16], European Commission Joint Research Centre [17], International Energy Agency (IEA) [10], International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS) [11], International Renewable Energy Agency (IRENA) [12], Hydrogen Europe [13], Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI) [18], Global Petrol Prices [19].

Сонячні фотоелектричні системи є одним із найбільш перспективних напрямів, враховуючи річний сонячний ресурс України у межах 1100–1500 кВт·год/м² [11]. Централізовані теплові системи можуть бути інтегровані з біомасою, тепловими насосами чи ТЕЦ на ВДЕ. Дизельні генератори, хоча й забезпечують найшвидше встановлення та реагування у випадку аварій, залишаються найбільш дорогим варіантом через високу вартість палива та залежність від імпорту. Натомість комбінація PV + BESS + біомаса є більш стійкою завдяки автономності та використанню локальних ресурсів.

У перспективі вагому роль можуть відігравати водневі технології та паливні елементи. Наразі вони переважно реалізуються у вигляді пілотних проєктів через відсутність інфраструктури H_2 та високі витрати, однак у середньо- та довгостроковій перспективі можуть стати важливим компонентом енергостійкості. «Розумні» мережі управління попитом також заслуговують особливої уваги, адже дозволяють інтегрувати відновлювані джерела, зменшувати пікові навантаження і, відповідно, підвищувати стійкість локальних енергетичних систем.

В результаті проведеного аналізу сформовано матрицю оцінювання енергозабезпечення житлових будівель (таблиця 2), яку можна використовувати у якості інструмента для обґрунтованого визначення пріоритетів і оптимального розподілу ресурсів під час вибору та впровадження технічних рішень у воєнний період. Представлена нижче система порівняльного оцінювання також дозволяє цілісно проаналізувати альтернативи та сформулювати стратегічно доцільні рекомендації щодо перспектив розвитку енергозабезпечення багатоквартирних житлових будівель у містах.

Таблиця 2. Оціночна матриця технічних рішень енергозабезпечення для житлових будівель у воєнний період

Table 2. Assessment matrix of technical energy supply solutions for residential buildings during wartime

Технічне рішення	Критерій оцінки						Загальна сума балів
	Рівень пріоритету	Енерго-ефективність	Економічна ефективність	Масштабованість	Сталий розвиток	Стійкість	
Розумні мережі + управління попитом	5	5	4	5	5	5	29
Централізоване теплопостачання	4	5	4	4	5	5	28
Сонячні фотоелектричні системи	5	5	4	5	5	4	28
Системи накопичення енергії (акумулятори)	5	5	3	5	5	4	27
Геотермальні теплові насоси	5	5	3	3	5	5	26
Підключення до мережі	3	3	4	5	3	2	20
Вітрові мікротурбіни	3	4	3	5	3	2	20
Когенерація (виробництво тепла й електроенергії)	3	4	4	4	3	2	20
Водневі паливні елементи	2	5	1	2	5	5	20
Дизель-генератори	4	2	2	5	1	5	19
Біомасові системи опалення	2	3	3	3	3	3	17

Примітка: Наведені в таблиці 2. технічні рішення оцінено по 5-бальній системі – від 1 (мінімальний) до 5 (максимальний) – за наступними критеріями:

- 1) рівень пріоритетності – визначається шляхом аналізу вигід, готовності та стратегічної цінності;
- 2) енергоефективність – яка кількість корисної енергії отримується відносно витрат;
- 3) вартість – включає як початкові інвестиції, так і експлуатаційні та обслуговуючі витрати;
- 4) масштабованість – легкість впровадження для різних типів і масштабів будівель;
- 5) сталий розвиток – довгострокова екологічна сумісність і відповідність стандартам ESG/«зеленим» стандартам;
- 6) стійкість – здатність функціонувати в умовах стресу (війна, відключення електроенергії, кліматичні події).

У період війни в Україні критично важливою стала здатність міст швидко адаптуватися до нових загроз. Матриця оцінки технічних рішень у цьому контексті відіграє ключову, адже її застосування разом із навчанням муніципалітетів практичним кейсам дозволяє формувати ефективні сценарії реагування на виклики в енергетичній сфері. У процесі створення осередкової енергомережі громада використовує матрицю оцінки як інструмент для прийняття зважених і обґрунтованих рішень. Спочатку на основі локального енергомоніторингу збирається інформація про реальні потреби й можливості; потім альтернативи порівнюються за допомогою матриці - наприклад, чи доцільно інвестувати в сонячні або газові генератори, чи краще встановити акумуляторні системи, чи розвивати кооперацію між приватними виробниками енергії. Всі ці рішення приймаються не інтуїтивно, а з урахуванням багатьох факторів, які формально оцінені.

В умовах постійної небезпеки, що постає для енергетичної інфраструктури України, виникає необхідність переходу до децентралізації виробництва електроенергії, що дає змогу підтримувати роботу електромереж навіть за припинення роботи основних ліній передачі та централізованих джерел живлення. Для забезпечення надійного джерела й безперервного постачання енергії доцільно впроваджувати різноманітні стратегії диверсифікації — за допомогою розвитку локальної генерації, впровадження системи накопичення, а також ефективного управління споживанням. Кожне управлінське рішення чи стратегія у сфері енергозабезпечення має обґрунтовуватися на комплексній оцінці всіх релевантних факторів. Недостатній аналіз окремих аспектів, таких як економічна ефективність, стійкість до зовнішніх загроз, екологічний вплив чи технологічна гнучкість, може призвести до нерационального використання ресурсів і зниження надійності системи. Для якісного проведення такого аналізу доцільно використовувати багатокритеріальний аналіз рішень (Multiple Criteria Decision Analysis, MCDA).

У сучасних умовах MCDA набуває особливої важливості для України у сфері технічного енергозабезпечення. Зважаючи на безпрецедентні виклики, спричинені широкомасштабною військовою агресією, руйнуванням енергетичної інфраструктури та необхідністю забезпечення енергетичної безпеки, постає потреба у впровадженні системних і комплексних підходів до ухвалення рішень. Традиційні підходи, що фокусуються переважно на одному або декількох ізольованих критеріях (наприклад, економічній доцільності чи технічній ефективності), вже не відповідають сучасним реаліям та вимогам часу. MCDA дозволяє перейти до інтегрованої оцінки, враховуючи широкий спектр кількісних та якісних критеріїв, серед яких стійкість до зовнішніх загроз, економічна ефективність, екологічна безпека, здатність до інтеграції з європейськими енергомережами, ресурсна доступність та технологічна гнучкість [20].

MCDA забезпечує:

- системний і прозорий процес вибору оптимальних рішень,
- комплексну оцінку впливу кожного фактора,
- підвищення ефективності використання наявних ресурсів,
- адаптивність до зовнішніх викликів та загроз.

З практичної точки зору, використання багатокритеріального аналізу уможливорює формування збалансованих стратегій розвитку енергетики, вибору пріоритетних об'єктів для відновлення, а також визначення найефективніших напрямків інвестування [21]. Такий підхід є особливо актуальним для України, яка сьогодні змушена оперативного трансформувати енергетичний сектор, зміщуючи акцент на децентралізовані та відновлювані джерела енергії. Комплексна оцінка різних альтернатив дозволяє значно підвищити якість управлінських рішень, зменшити залежність від окремих джерел енергії, а також сприяє інтеграції до європейського енергетичного простору [20, 22].

Взаємозв'язки між об'єктами громади формують мережу реагування, здатну забезпечити гнучкість і надійність енергетичної системи. Осередкова енергетична мережа (СЕН) об'єднує локальні джерела виробництва та споживання електроенергії із сучасними методами управління попитом і балансуванням для підтримки стійкості громади. Нині до складу локальних енергетичних мереж можуть входити різні засоби виробництва та зберігання електроенергії: бензинові, дизельні, газові генератори, відновлювані джерела (сонячні, вітрові, гідроелектростанції), а також станції накопичення енергії. Однак основна тенденція майбутнього – поступова відмова від джерел на викопному паливі на користь повномасштабної інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [23]. Осередкова енергетична мережа, якою управляє оператор системи розподілу (DSO), базується переважно на відновлюваних джерелах: це вітрові (WPS), сонячні (SPS) та гідроелектростанції (HPP). Така мережа орієнтована на забезпечення енергією широкого кола споживачів – домогосподарств, комунальних підприємств, закладів соціальної сфери та промисловості.

Етапи створення осередкової енергомережі:

Перший етап (короткостроковий). Відбувається створення енергетичного кооперативу для об'єднання запитів місцевих споживачів електроенергії, організації прозорої та ефективної централізованої закупівлі енергії через спільні тендерні процедури. Такий крок дозволяє громаді ефективніше використовувати бюджетні ресурси.

Другий етап (середньостроковий). Запроваджуються власні джерела виробництва електроенергії та енергоефективні заходи. Це сприяє зниженню залежності від сторонніх постачальників і поступовому скороченню енергоспоживання, що веде до зростання енергетичної стійкості громади.

Третій етап (довгостроковий). Паралельно з розвитком генеруючих потужностей застосовуються сучасні системи управління попитом, балансуванням енергії та допоміжними послугами. Це дає можливість формувати додаткові надходження до місцевого бюджету і забезпечувати стабільність енергомережі.

Прикладом створення СЕН в Україні є проект у місті Долина, де за підтримки міжнародних партнерів запропоновано розбудову децентралізованої «розумної» мережі, яка об'єднує місцеві відновлювані джерела енергії, акумуляційні системи та енергоефективні технології. Завдяки такому підходу вдалося скоротити споживання енергії на 30%, підвищити енергонезалежність громади та забезпечити економічну і соціальну стійкість [24].

Системний підхід до оцінки та впровадження технічних рішень, їхнє раціональне поєднання й інтеграція на рівні громади дозволяють створити надійну та гнучку енергетичну систему, яка здатна забезпечити стійкість до різних викликів і загроз. Технічні рішення повинні відповідати не лише поточним потребам, а й враховувати довгострокову перспективу розвитку громади, її специфіку, доступні ресурси, фінансові можливості та потенціал до масштабування. Тобто матриця технічних рішень може видозмінюватись залежно від пріоритетності критеріїв, визначених певною громадою. Такий взаємозв'язок є головним чинником для обрання раціонального варіанту енергозабезпечення, який відповідатиме як власним потребам, так і програмі зеленого розвитку.

В умовах підвищених ризиків порушення енергопостачання, характерних для воєнного часу, ефективне функціонування систем енергозабезпечення багатоповерхових міських будівель залежить від інтеграції та взаємодоповнення різних технічних рішень, які

спільно формують гнучку, стійку та багаторівневу архітектуру енергетичного середовища (Рис. 1).

Розроблена схема відображає системну архітектуру енергозабезпечення міських будівель, побудовану на принципах багаторівневої резервності, гнучкості та пріоритетного використання локальних ресурсів. Модель враховує режими функціонування як у мирний період, так і в умовах воєнних дій, коли надійність постачання з зовнішньої мережі може бути обмеженою або повністю відсутньою.



Рис.1. Схема технічних рішень забезпечення енергією і теплом багатоповерхових міських будівель
 Fig. 1. Scheme of technical solutions for providing energy and heat to multi-storey urban buildings

Базовим рівнем залишається підключення до національної електромережі, що забезпечує централізоване живлення будівель у звичайних умовах. Проте у кризових ситуаціях, пов'язаних із відключеннями чи пошкодженням інфраструктури, основне навантаження поступово переходить на децентралізовані та автономні джерела енергії, які можуть функціонувати незалежно або в режимі взаємного резервування.

5. Висновки. 1. Дослідження показало, що найбільш універсальними рішеннями для енергетичної та екологічної стійкості будівель і громад в умовах війни є інтеграція сонячних фотоелектричних систем із накопичувачами енергії, застосування геотермальних технологій, «розумних» енергомереж з автоматизованим управлінням попитом та гнучке використання когенерації в громадських будівлях.

2. Серед проаналізованих альтернатив найвищий потенціал енергетичної автономності забезпечують комбіновані системи (PV + накопичувачі + когенерація), які дозволяють підтримувати базове навантаження навіть за повної втрати централізованого електропостачання. Відновлювальні джерела, насамперед дахові й розподілені PV, забезпечують гнучкість, швидке реагування та автономну генерацію, але потребують поєднання з системами накопичення для згладжування нестачі генерації й пікових навантажень; їх ефективність залежить від локації, масштабу й умов експлуатації.

3. Схема пріоритетності енергозабезпечення демонструє взаємодію централізованих мереж і локальної мікрогенерації, що дозволяє формувати гібридні енергетичні кластери з високою гнучкістю, відмовостійкістю та керованістю. Інтеграція систем управління попитом є

ключовим елементом адаптивності енергосистем у кризових умовах, забезпечуючи баланс між споживанням, генерацією та накопиченням енергії й підсилюючи стійкість будівель і громад.

4. Моделі розподіленої генерації та осередкових енергомереж підвищують не лише енергетичну автономію, а й екологічну безпеку та економічну незалежність громад, демонструючи ефективність у зменшенні витрат і підтримці соціальних сервісів під час тривалих перебоїв електропостачання. Енергетична стійкість будівель і громад за воєнних ризиків прямо залежить від рівня децентралізації енергопостачання й інтеграції локальних ВДЕ, але її реалізація обмежується фінансуванням, регуляторними умовами, логістикою та надійністю постачання обладнання.

5. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів багатокритеріальної оптимізації для складних енергосистем, розробку інтегрованих методів оцінки ризиків та адаптивності сценаріїв впровадження технологій, а також пошук ефективних фінансових і комунікаційних моделей для масштабування децентралізованих рішень у різних типах регіонів.

Список використаних джерел:

1. Укргідроенерго. Децентралізація енергетики: стратегічні плани України. Режим доступу: <http://uhe.gov.ua/media/tsentr/novyny/detsentralizatsiya-enerhetyky-stratehichni-plany-ukrayiny>
2. Liu, R. (2024). Hybrid microgrids in crisis response: An international perspective. *Smart Energy Systems*, 22(3), 134–147.
3. Krivtsov, S. (2023). Environmental impact of wartime energy infrastructure damage in Ukraine. *Environmental Security Review*, 18(2), 95–109.
4. Brown, J. (2023). Decentralised power and community adaptation amid crisis. *International Journal of Energy Policy*, 37(4), 204–218.
5. Chernyak, A. (2023). Resilience of energy systems under wartime stress. *Journal of Energy Security*, 43(1), 21–35.
6. Yatsyshin, O. (2023). Hydrogen and battery storage technologies in crisis management. *Energy Engineering*, 49(1), 52–68.
7. Winkler, C., Dabrock, K., Kapustyan, S., Hart, C., Heinrichs, H., Weinand, J.M., Linßen J. & Stolten, D. (2025). High-resolution rooftop photovoltaic potential assessment for Ukraine. *Energy Conversion and Management*, 28, 101242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101242>
8. Oleksiuk, V. (2025). Green energy as a tool for resilience and recovery of Ukraine during the war and in the post-war period. *Modern Economics*, 50, 136-143. DOI: 10.31521/modecon.V50(2025)-18
9. Joint Research Centre of the European Commission. (2025). Available at: <http://joint-research-centre.ec.europa.eu>
10. International Energy Agency. (2025). IEA Data and Statistics. Energy Prices. Available at: <http://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/energy-prices>
11. International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme. (2025). Available at: <http://iea-pvps.org>
12. International Renewable Energy Agency. (2025). Available at: <http://www.irena.org>
13. Hydrogen Europe. (2025). Available at: <http://hydrogeneurope.eu>
14. Sahabuddin, M., & Khan, I. (2021). Multi-criteria decision analysis methods for energy sector's sustainability assessment: Robustness analysis through criteria weight change. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101380. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101380>.
15. Official website of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. (2025). Available at: <http://saee.gov.ua>
16. Official website of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors. (2025). Available at: <https://www.nerc.gov.ua>
17. European Commission. (2023). *Towards resilient energy networks in Europe: Policy report*. Brussels: Publications Office of the European Union.
18. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (2025). Available at: <http://www.mdpi.com>
19. Global Petrol Prices. Ukraine electricity prices. (2025). Available at: http://www.globalpetrolprices.com/Ukraine/electricity_prices/
20. Гирич О. С. (2024). Поняття енергетичної безпеки за законодавством України. *Юридичний науковий електронний журнал*, 8, 323–325. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-8/75>

21. Щуров І. В. (2022). Енергетична безпека держави: концепція формування стратегічних векторів зміцнення. *Економіка і регіон*, 4(87), 319–326. [https://doi.org/10.26906/EiR.2022.4\(87\).2814](https://doi.org/10.26906/EiR.2022.4(87).2814)
22. Шевченко О. А. (2021). Енергетична безпека як невід’ємний елемент забезпечення економічної безпеки держави в стратегіях національної безпеки України. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*, 67, 163–168. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2021.67.32>
23. Chen, W., Zhang, X., Li, Y., & Han, B. (2024). Simultaneous community energy supply-demand optimization by multi-microgrid operation scheduling in distribution networks. *Applied Energy*, 359, 122347. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261924013059>
24. Бондаренко Ю., Дирій І., Уніховський Л., Чех С. (2024). Бізнес-модель для сотової енергетичної мережі Долинської територіальної громади. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://e-b.com.ua/biznes-model-dlya-sotovoyi-energetichnoyi-merezi-dolinskoyi-tergromadi-6214>

References:

1. Ukrhydroenergo. Decentralization of energy: strategic plans of Ukraine.
2. Liu, R. (2024). Hybrid microgrids in crisis response: An international perspective. *Smart Energy Systems*, 22(3), 134–147.
3. Krivtsov, S. (2023). Environmental impact of wartime energy infrastructure damage in Ukraine. *Environmental Security Review*, 18(2), 95–109.
4. Brown, J. (2023). Decentralised power and community adaptation amid crisis. *International Journal of Energy Policy*, 37(4), 204–218.
5. Chernyak, A. (2023). Resilience of energy systems under wartime stress. *Journal of Energy Security*, 43(1), 21–35.
6. Yatsyshin, O. (2023). Hydrogen and battery storage technologies in crisis management. *Energy Engineering*, 49(1), 52–68.
7. Winkler, C., Dabrock, K., Kapustyan, S., Hart, C., Heinrichs, H., Weinand, J.M., Linßen J. & Stolten, D. (2025). High-resolution rooftop photovoltaic potential assessment for Ukraine. *Energy Conversion and Management*, 28, 101242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101242>
8. Oleksiuk, V. (2025). Green energy as a tool for resilience and recovery of Ukraine during the war and in the post-war period. *Modern Economics*, 50, 136–143. DOI: 10.31521/modecon.V50(2025)-18
9. Joint Research Centre of the European Commission. (2025). Available at: <http://joint-research-centre.ec.europa.eu>
10. International Energy Agency. (2025). IEA Data and Statistics. Energy Prices.
11. International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Programme. (2025).
12. International Renewable Energy Agency. (2025). Available at: <http://www.irena.org>
13. Hydrogen Europe. (2025). Available at: <http://hydrogeneurope.eu>
14. Sahabuddin, M., & Khan, I. (2021). Multi-criteria decision analysis methods for energy sector's sustainability assessment: Robustness analysis through criteria weight change. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101380. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101380>.
15. Official website of the State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. (2025).
16. Official website of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors. (2025).
17. European Commission. (2023). *Towards resilient energy networks in Europe: Policy report*. Brussels: Publications Office of the European Union.
18. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. (2025).
19. Global Petrol Prices. Ukraine electricity prices. (2025).
20. Hyrych, O. S. (2024). The concept of energy security according to the legislation of Ukraine. *Legal Scientific Electronic Journal*, 8, 323–325. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-8/75>
21. Shchurov, I. V. (2022). The concept of forming strategic vectors for strengthening the state’s energy security. *Economics and Region*, 4(87), 319–326. [https://doi.org/10.26906/EiR.2022.4\(87\).2814](https://doi.org/10.26906/EiR.2022.4(87).2814)
22. Shevchenko, O. A. (2021). Energy security as an integral element of ensuring the economic security of the state in the national security strategies of Ukraine. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series: Law*, 67, 163–168. <https://doi.org/10.24144/2307-3322.2021.67.32>
23. Chen, W., Zhang, X., Li, Y., & Han, B. (2024). Simultaneous community energy supply-demand optimization by multi-microgrid operation scheduling in distribution networks. *Applied Energy*, 359, 122347.
24. Bondarenko, Y., Dyriy, I., Unihovsky, L., & Chekh, S. (2024). Biznes-model dlia sotovoi enerhetychnoi merezhi Dolynskoi terhomady [Business model for a cellular energy network of the Dolyna community].

УДК 711.16:728:504

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0615>**¹Артем Циба,**

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці

<https://orcid.org/0009-0006-4532-0982>, e-mail: absqueee@gmail.com¹Київський національний університет будівництва і архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЙ ВІДБУДОВИ ЖИТЛОВОГО ФОНДУ НА ОСНОВІ ЕКОЛОГІЧНИХ, СОЦІАЛЬНИХ ТА УПРАВЛІНСЬКИХ КРИТЕРІЇВ

АНОТАЦІЯ. У статті обґрунтовано впровадження методики вибору технологій для будівельних проєктів на основі екологічних, соціальних та управлінських критеріїв. Набули розвитку науково-методичні засади реконструкції житлового фонду, які забезпечують баланс між екологічною ефективністю, соціальною адаптивністю та управлінською прозорістю при обмеженості ресурсів в умовах підвищення вимог до стійкості будівель та збереження довкілля. На основі детально розробленого фреймворку європейських стандартів сталої звітності визначено ключові набори критеріїв оцінки будівельних проєктів для порівняння наявних технологій. Запропоновано матрицю оцінювання проєктів, що дозволяє комплексно аналізувати ефективність будівельних рішень у контексті відновлення житла. Практичне застосування запропонованої матриці дозволяє здійснити порівняльний аналіз альтернативних варіантів реконструкції, що демонструє її потенціал у якості інструменту прийняття обґрунтованих технічних рішень. Такий підхід забезпечує довгострокову стійкість рішень шляхом вибору кращих енерго- та ресурсозберігаючих технологій із врахуванням соціальних потреб ключових стейкхолдерів на основі застосування оптимальних шляхів управління проєктами. У роботі розглянуто сучасні підходи до інтеграції екологічно орієнтованих рішень у процесі реконструкції, з акцентом на мінімізацію негативного впливу на довкілля, підвищення енергоефективності та забезпечення соціальної адаптивності житлових об'єктів. Методика орієнтована на забезпечення потреб громадян України, інтереси інвесторів та вимоги міжнародного законодавства. Використання запропонованої матриці дозволяє підвищити прозорість процесу реконструкції житла, що сприяє залученню міжнародних інвестицій та цільової фінансової підтримки. Відзначено універсальність ESG-підходу у якості ефективного інструменту для прийняття рішень у виборі підходів до відбудови, реконструкції, нового будівництва, експлуатації та знесення житлових будівель.

Ключові слова: сталий розвиток, екологічна безпека, захист довкілля, технології реконструкції, житловий фонд, міське будівництво, соціальні гарантії, управлінські рішення.

SELECTION OF HOUSING RECONSTRUCTION TECHNOLOGIES BASED ON ENVIRONMENTAL, SOCIAL AND GOVERNANCE CRITERIA

ABSTRACT. The article substantiates the implementation of a methodology for selecting technologies in construction projects based on environmental, social, and governance criteria. It advances the scientific and methodological foundations for residential stock reconstruction, ensuring a balanced approach to ecological efficiency, social adaptability, and managerial transparency under resource constraints and increasing sustainability demands. A comprehensive framework aligned with European sustainability reporting standards is developed to identify key sets of evaluation criteria for comparing available construction technologies. The proposed project assessment matrix enables an integrated analysis of the effectiveness of construction solutions in the context of housing recovery. Its practical application facilitates comparative evaluation of alternative reconstruction scenarios, demonstrating its potential as a decision-support tool for technically sound and context-sensitive solutions. This approach promotes long-term resilience by prioritizing energy- and resource-efficient technologies while addressing the social needs of key stakeholders through optimized project management pathways. The study explores contemporary strategies for integrating environmentally oriented solutions into reconstruction processes, with emphasis on minimizing environmental impact, enhancing energy performance, and ensuring the social adaptability of residential buildings. The methodology is tailored to meet the needs of Ukrainian citizens, investor interests, and international legal requirements. Application of the proposed matrix enhances transparency in housing reconstruction, thereby

fostering international investment and targeted financial support. The universality of such approach is highlighted as an effective instrument for decision-making across rebuilding, renovation, new construction, operation, and deconstruction of residential assets.

Keywords: *sustainable development, environmental safety, environmental protection, reconstruction technologies, housing stock, urban construction, social guarantees, governance decisions.*

1. Постановка проблеми. Однією з найбільш актуальних проблем будівельної галузі України є відновлення зруйнованих внаслідок війни будівель та інфраструктури. Крім того, житловий фонд України характеризується значним обсягом застарілих та невідповідних сучасним вимогам будівель, що потребують комплексної реконструкції. Необхідно терміново не лише відновити житло та інфраструктуру, а й забезпечити відповідність прийнятому курсу зеленого відновлення за принципом «відбудуємо краще, ніж було» [1]. Необхідність імплементації звітності зі сталого розвитку, а також потреба у підвищенні енергоефективності, розвитку відновлюваних джерел енергії та соціальної інклюзивності житлових об'єктів створюють запит на нові науково-методичні підходи [2]. Водночас, практична реалізація таких підходів потребує адаптації до специфічних умов різних регіонів нашої країни, зокрема врахування ступеню зруйнованості, рівня безпеки, доступності ресурсів, стану виробничої інфраструктури, можливостей логістики, специфіки ландшафту та природних умов. Відсутність комплексних методик оцінки, які одночасно враховують екологічні, соціальні та управлінські критерії, ускладнює прийняття обґрунтованих рішень щодо вибору технологій реконструкції та будівництва житла. Розробка структурованої моделі вибору технологій реконструкції житла дозволить інтегрувати критерії сталого розвитку та екологічної безпеки у процес прийняття технічних рішень, забезпечуючи баланс між ефективністю управління, зменшенням впливу на довкілля та соціальною відповідальністю будівельних проєктів.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдяки впровадженню стандартів сталої звітності ESRS (European Sustainability Reporting Standards), «зелені» ідеї з декларативних заяв набувають форми чітких критеріїв з вимірюваними параметрами, які можуть бути інтегровані в процес вибору технологій реконструкції житла. В роботах А. Lorenz та J. Lützkendorf зазначено, що «оцінка сталого розвитку в будівництві еволюціонувала від якісних декларацій до кількісних показників, вбудованих у моделі прийняття рішень» [3]. Це також підтверджується низкою міжнародних досліджень, де ESG-підходи розглядаються як основа для прийняття технічно та екологічно обґрунтованих рішень в процесі формування інвестиційної привабливості будівельних проєктів [4]. ESG-орієнтовані підходи до реконструкції забезпечують впровадження показників прозорості управління, соціальної інклюзивності та екологічної відповідальності. Зокрема методом Delphi на основі ESRS для міста Флоренція (Італія) було визначено 48 екологічних, економічних та соціальних критеріїв із 74 показниками для оцінки житлових проєктів [5].

Концепція «відбудуємо краще, ніж було» стала ключовим принципом планування післявоєнного відновлення України для створення сучасної, сталої та конкурентоспроможної держави [6]. Наголошують на необхідності реконструкції житла в Україні з урахуванням кліматичних змін, енергоефективності та європейських екологічних стандартів [7]. Українські науковці активно досліджують теоретичні засади та практичні аспекти зеленого будівництва для збалансованого розвитку суспільства шляхом впровадження нових економічних та екологічних інструментів, технологій та заходів, що можуть забезпечити взаємодію між економічним розвитком і захистом довкілля [8]. Наголошують на необхідності адаптації міжнародних стандартів (BREEAM, LEED, DGNB, WELL) в українське законодавство, з урахуванням культурних, економічних та кліматичних особливостей [9]. Будівельна галузь розглядається, як інструмент досягнення Цілей сталого розвитку ООН для створення безпечного, доступного та стійкого житлового середовища [10]. Акцентовано на важливості використання екологічно сертифікованих матеріалів та технологій, що знижують вуглецевий слід реконструйованих об'єктів [9, 10]. Пропонують

мультикритеріальні моделі оцінювання, які враховують життєвий цикл будівлі, енергоспоживання та потенціал повторного використання конструктивних елементів. Українські науковці досліджують можливості реконструкції житла в умовах воєнного та поствоєнного періоду, акцентуючи на екологічній безпеці, енергоефективності та соціальній реінтеграції внутрішньо переміщених осіб. Особливу увагу приділено адаптації будівель до змін клімату, зокрема через використання пасивних технологій та локальних екологічно чистих матеріалів. Обґрунтовують необхідність застосування критеріїв ESG (Environment, Social, Governance) у проєктній документації та тендерних процедурах зеленої відбудови України [11].

Водночас, попри наявність значної кількості досліджень, спостерігається дефіцит методик, які б дозволяли інтегрувати екологічні та соціальні критерії в єдину модель вибору технологій реконструкції, адаптовану до українських реалій. Це обумовлює необхідність розробки структурованого підходу, що поєднує міжнародний досвід із вітчизняними потребами та ресурсними обмеженнями для інтеграції екологічних, соціальних та управлінських критеріїв у процес прийняття рішень щодо модернізації будівель. Це створює підґрунтя для інтеграції ESG-критеріїв у якості інструментів оцінки ефективності реконструкції житла для вибору найкращих технологій.

3. Мета роботи. Обґрунтувати матрицю вибору технологій реконструкції та будівництва житла, яка інтегрує екологічні, соціальні та управлінські критерії в процес відновлення житлового фонду України.

4. Матеріали та методи. Для розрахунків інтегрованої матриці вибору технологій реконструкції житла на основі критеріїв сталої звітності рекомендовано обирати методики мультикритеріального аналізу: метод аналізу ієрархій (Analytical Hierarchy Process, АНР), метод Делфі (Delphi), багатокритеріальний аналіз альтернатив (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS), систему зваженого оцінювання.

Для уніфікації кількісних та якісних параметрів проводиться експертна оцінка в балах, де 0 – вимоги не виконано або дані відсутні, 1 – мінімальні показники на базовому рівні, 2 – рівень вище базового, 3 – відповідність нормам, 4 – відповідність міжнародним стандартам, 5 – результати перевищують очікування. Категорії показників розподіляють за пріоритетністю у такому співвідношенні: екологічні $E = 40\%$, соціальні $S = 30\%$, управлінські $G = 30\%$.

Сумарний бал розраховується за наступною формулою (1):

$$ESG_b = 0,4 \times E_b + 0,3 \times S_b + 0,3 \times G_b, \quad (1)$$

де ESG_b – сумарний бал стандартів сталої звітності; E_b – бали за екологічні показники; S_b – бали за соціальні показники; G_b – бали за управлінські показники.

Інтегрована модель вибору технологій реконструкції житла адаптована до стандартів ISO 14040-14043 аналізу життєвого циклу будівельних проєктів (life cycle analysis, LCA), як базису для порівняльної оцінки варіантів реконструкції [7].

5. Результати дослідження. Стандарти ESRS охоплюють близько 1200 показників (data points) для розкриття екологічних, соціальних та управлінських параметрів універсальних бізнес процесів (див.табл.1). ESG фреймворк можливо також застосовувати для комплексної оцінки проєктів будівництва, оскільки він вже ретельно опрацьований для міжнародних стандартів сталого звітування.

Екологічна складова (Environmental) охоплює заходи, спрямовані на зниження викидів парникових газів, раціональне використання природних ресурсів, ефективне управління відходами та впровадження екологічно безпечних технологій. Зокрема особлива увага приділяється скороченню споживання енергоресурсів, використанню відновлюваних джерел енергії та мінімізація вуглецевого сліду проєкту.

Соціальна складова (Social) пов'язана з впливом на суспільство та всіх стейкхолдерів проєкту. В ході виконання проєкту необхідно налагодити конструктивну взаємодію з місцевими громадами, організувати безпечні умови праці, просувати принципи рівності та

інклюзивності, а також дотримання прав людини. Практичні заходи включають створення програм професійного навчання та підвищення кваліфікації персоналу, поліпшення умов праці та забезпечення гендерного балансу.

Таблиця 1. Екологічні, соціальні та управлінські параметри стандартів сталої звітності
Table 1. Environmental, social and governance data points of sustainability reporting standards

№	Тематика ESRS стандартів	Кількість показників
1	Кліматичні питання – ESRS E1	223
2	Забруднення – ESRS E2	71
3	Водні ресурси – ESRS E3	51
4	Біорізноманіття та екосистеми – ESRS E4	122
5	Циркулярна економіка – ESRS E5	87
6	Працівники організації – ESRS S1	202
7	Працівники ланцюга постачання – ESRS S2	70
8	Місцеві громади – ESRS S3	68
9	Споживачі – ESRS S4	67
10	Управління бізнесом – ESRS G1	55

Управління (Governance) передбачає формування ефективної системи управління проектом, що включає прозорість процесів ухвалення рішень, дотримання етичних норм у бізнесі та відповідність правовим і регуляторним вимогам. Серед ключових аспектів – формування незалежних рад директорів, впровадження антикорупційних механізмів та забезпечення відповідності чинному законодавству.

Матриця ESG показників дозволяє порівнювати різні варіанти реалізації будівельних проектів на основі універсальних критеріїв. На основі ESG матриці можливо вибрати специфічні технології, в залежності від особливостей конкретного проекту. Розрахунки з використанням ESG критеріїв комплексно обґрунтовують напрямок відбудови шляхом реконструкції будівлі або шляхом повного знесення та нового будівництва.

ESG-матриця дає змогу визначити пріоритетні проекти реконструкції, забезпечити прозорість та відповідність міжнародним практикам, сприяти економічній привабливості проектів. Завдяки уніфікованим критеріям глобальні концепції адаптуються до локальної специфіки. Використання матриці полегшить українським будівельним компаніям перехід на ESRS звітність, яка вже стає обов'язковою для всіх сфер економіки не тільки в Європі і США, але й в Україні. При цьому відповідність ESG критеріям не тільки знижує шкідливі викиди та економить ресурси, але й відкриває можливості для «зеленого» фінансування проекту.

В залежності від специфіки проекту можна обирати індивідуальний набір критеріїв, який затверджується методом експертної оцінки, орієнтований на конкретні потреби і вимоги проекту. Цей інструмент допоможе комплексно оцінювати будівельні проекти в трьох ключових вимірах – екологія, соціум і управління. Такий підхід створює основу для сертифікації житла згідно міжнародним стандартам зеленого будівництва BREEAM, DGNB, LEED, WELL і відкриває можливості залучення «зелених» інвестицій та міжнародного фінансування.

Розроблено приклад ESG-матриці для оцінки проектів реконструкції житла, де якісні і кількісні показники розподілені за екологічними (Environmental), соціальними (Social) та управлінськими (Governance) параметрами, які можливо адаптувати до конкретних вимог проектів (табл.2).

Таблиця 2. Приклад ESG-матриці для реконструкції житла
Table 2. Example of an ESG matrix for housing reconstruction

№	ESG показники	Спосіб оцінки
<i>Екологічні (E – Environment)</i>		
1	Енергоефективність	дані лічильників і приладів, кВт·год/м ² /рік
2	Встановлення ВДЕ	кВт PV, кВт·год/рік, % покриття потреб
3	Вуглецевий слід	втілений і експлуатаційний вуглець, CO ₂ e/м ² житлової площі, оцінка життєвого циклу (WLCA)
4	Практики циркулярної економіки	% переробки відходів; % матеріалів зі зниженою емісією, вторинні, місцеві, традиційні
5	Управління водними ресурсами	м ³ /м ² /рік споживання, повторне використання, локальна очистка, ресурс дощу і снігу
<i>Соціальні (S – Social)</i>		
6	Комфорт та здоров'я	якість повітря (IAQ), рівень освітленості (природне/штучне), шумовий фон, стандарти WHO
7	Безпека	пожежний захист, надійні конструкції, резервні енергосистеми, автономність
8	Інклюзія	індекс доступності планування, % безбар'єрної площі, пільгові програми, % соціального житла,
<i>Управління G (Governance)</i>		
9	Прозорість	Звітність про ESG-показники, оприлюднення даних, антикорупційні заходи
10	Сталі закупівлі	Відкриті тендери, використання сертифікованих товарів (EPD, eco-label, Energy Star)
11	Відповідність стандартам	ISO, ДБН, ДСТУ, BREEAM, DGNB, LEED, WELL
12	Фінансова привабливість	Залученість зеленого фінансування, інвестицій, грантів, цільової міжнародної підтримки
13	Рівність і справедливість	Об'єктивна оцінка орієнтована на професіоналізм виконавців, захищеність

Алгоритм використання ESG-матриці вибору проєктів для визначення оптимальних технологій відновлення житла складається із трьох основних етапів:

1) оцінка – кожен критерій оцінюється в абсолютних величинах (наприклад, кВт·год/м², %, CO₂e/м², тощо) або за шкалою від 1 до 5;

2) пріоритизація – різні варіанти зважених критерії порівнюються і обираються в залежності від пріоритетів проєкту з урахуванням специфіки умов;

3) моніторинг – в процесі реалізації та експлуатації здійснюється моніторинг прогресу для аналітичних висновків та практичних заходів щодо покращення технологій.

Попередня оцінка ключових показників і порівняння наявних технологій дозволяє вибрати оптимальний варіант з урахуванням пріоритетів конкретного проєкту. Ключові набори критеріїв охоплюють енерго- та ресурсоефективність, зниження викидів, покращення соціальних умов та управлінських систем. У якості базових стандартів енергоефективності, теплоізоляції, пожежної безпеки рекомендовано орієнтуватися на українські ДБН та ДСТУ, а стосовно вимог екологічного менеджменту, контролю викидів CO₂, оцінки життєвого циклу, соціальної відповідальності та інклюзії, ESG-матриця регулюється міжнародним законодавством та ISO. Сумарний ESG-індекс можна застосовувати не тільки для загальної оцінки проєкту, але також для окремих категорій і параметрів, що дозволяє зосередитись на виборі певної технології при обмежених ресурсах.

Слід зазначити, що екологічні переваги проєкту не завжди корелюють із соціальною прийнятністю або простотою управління через складність реалізації, потребу в додатковому

фінансуванні та внаслідок недостатньої поінформованості широкого загалу. Це підтверджує необхідність комплексного підходу, де екологічна ефективність збалансована з соціальним фактором та особливостями управління. Використання цифрових технологій Lean Construction Management призводить до зниження 50% викидів CO₂, економії енергії 50 кВт·год/м² та збереження водних ресурсів до 70%. Впровадження принципів циркулярної економіки дозволяє досягти 15-25 % економії, переробка будівельних відходів зростає на 60%, а модернізація відбувається із заміщенням до 70% матеріалів на вторинні. Завдяки впровадженню стандартів по забезпеченню здоров'я та комфорту побудованого середовища відмічається зменшення захворюваності на 25% та підвищення продуктивності на 15%. Технології з високим рівнем стандартизації краще інтегруються у публічні процедури, що спрощує процес моніторингу, аудиту та подання звітності. Зокрема, термомодернізація та утеплення фасадів, як технології з усталеними нормативами та сертифікацією, демонструють кращу інтеграцію у BIM-моделі, тендерні платформи та звітні системи.

Не залишається поза увагою, що параметри ESG-оцінки мають багато спільного з критеріями зеленого будівництва, однак є низка специфічних аспектів у рівні їх застосування та кінцевій меті. Стандарти зеленого будівництва застосовуються до конкретних будівель або об'єктів для оцінки енергоефективності, використання матеріалів, впливу на довкілля та комфорту для користувачів. ESG-показники аналізують не лише екологічні аспекти будівлі, а й соціальний вплив (робочі місця, безпека праці, інклюзивність) та управлінські процеси (корупційні ризики, прозорість, відповідність стандартам ЄС). Зелені стандарти функціонують у якості технічного інструменту, що підтверджує відповідність конкретного проекту критеріям сталого будівництва. ESG допомагає інвесторам, банкам та регуляторам оцінювати загальну стійкість компанії або портфеля проектів, а не лише окремої будівлі. В умовах зеленої відбудови України використання ESG-показників разом зі стандартами зеленого будівництва відкриває можливості доступу до міжнародного фінансування. Завдяки загальноприйнятим критеріям інвестори можуть об'єктивно оцінити переваги та недоліки різних проектів у порівнянні з міжнародними стандартами. Стандарти зеленого будівництва потрібні для технічної оцінки та сертифікації будівлі, а ESG-показники – для системної оцінки сталого розвитку проекту в контексті інвестиційної привабливості, прозорості та міжнародної інтеграції.

Використання ESG-матриці оптимізує процес прийняття рішень щодо вибору технологій в процесі реконструкції житла з вибором заходів, які найефективніше покращать загальний ESG-індикатор. Бальна ESG-оцінка враховується не тільки у нефінансовій звітності компаній, але й при інвестиційному відборі фінансування проектів та в процесі цільової міжнародної підтримки стратегій розвитку місцевих громад. ESG підходи орієнтовані не тільки на техніко-економічні показники, але й враховують вплив будівельних рішень на довкілля, якість життя мешканців та управлінську прозорість процесів будівництва та експлуатації житлових будівель. Подальший розвиток ESG-матриці включає підходи аналізу результатів та розробки заходів по покращенню базової моделі і практичних підходів. Застосування мультикритеріального аналізу дозволяє формувати прозорі, обґрунтовані та стратегічно виважені рішення. ESG-оцінка технологій реконструкції має універсальний характер і може бути використана як інструмент для інвесторів, девелоперів, місцевих громад та широкого кола стейкхолдерів відбудови житла в Україні. Інтеграція ESG-критеріїв в реконструкцію житла підвищує якість управлінських рішень, що особливо важливо для відновлення України після руйнівних наслідків війни, коли ресурси обмежені, а вимоги до стійкості зростають.

5. Висновки. 1. Обґрунтовано впровадження ESG-оцінки в процес вибору технологій реконструкції житла, що забезпечує баланс між екологічною ефективністю, соціальною адаптивністю та управлінською прозорістю при обмеженості ресурсів в умовах підвищення вимог до стійкості будівель та збереження довкілля.

2. Встановлено ключові набори критеріїв оцінки будівельних проектів для порівняння технологій, що охоплюють енерго- та ресурсоефективність, зниження викидів, покращення

соціальних умов та управлінських систем на основі детально розробленого фреймворку європейських стандартів сталої звітності ESRS.

3. Розроблено структуру ESG-матриці для реконструкції житла, що дозволяє: 1) підвищити прозорість процесу реконструкції; 2) забезпечити довгострокову стійкість рішень шляхом: а) вибору кращих енерго- та ресурсозберігаючих технологій; б) врахування соціальних потреб ключових стейкхолдерів проєктів; в) прийняття оптимальних рішень в управлінні проєктами; 3) залучити міжнародні інвестиції та фінансову підтримку.

4. Відзначено універсальність ESG-підходу у якості ефективного інструменту для прийняття рішень у виборі технологій відбудови, реконструкції, нового будівництва, експлуатації та знесення житлових будівель, що забезпечує потреби громадян України, вимоги міжнародного законодавства та інтереси інвесторів.

Список використаних джерел:

1. Ryabchyn, O. (2024). Scenarios of economic recovery of Ukraine: build back better vs business-as-usual. *Actual problems of international relations*, 1(161), 150-167. <https://doi.org/10.17721/apmv.2024.161.1.150-167>
2. Sierdovski, M., Pilatti, L. A., & Rubbo, P. (2022). Organizational competencies in the development of environmental, social, and governance (ESG) criteria in the industrial sector. *Sustainability*, 14(20), 13463. <https://doi.org/10.3390/su142013463>
3. Lorenz, D. & Lützkendorf, T. (2011). Sustainability and property valuation. *Journal of Property Investment & Finance*, 29(6), 644-676. <https://doi.org/10.1108/14635781111171797>
4. Bani-Khaled, S., Azevedo, G. & Oliveira, J. (2025). Environmental, social, and governance (ESG) factors and firm value: A systematic literature review of theories and empirical evidence. *Academy of Marketing Science Review*, 15, 228–260. <https://doi.org/10.1007/s13162-025-00303-2>
5. Battisti, F. (2023). SDGs and ESG criteria in housing: defining local evaluation criteria and indicators for verifying project sustainability using Florence metropolitan area as a case study. *Sustainability*, 15(12), 9372. <https://doi.org/10.3390/su15129372>
6. Lee, S.T. (2023). A battle for foreign perceptions: Ukraine's country image in the 2022 war with Russia. *Place branding and public diplomacy*, 19, 345–358. <https://doi.org/10.1057/s41254-022-00284-0>
7. Delehan, S., Melehan, H.; Nate, S. (Ed.) (2025). *Environmental and Energy Security on the Way to Rebuilding Ukraine on the Principle of Zero Carbon Footprint. Ukraine's Journey to Recovery, Reform and Post-War Reconstruction. Contributions to Security and Defence Studies.* Springer Cham, 315. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66434-2_14
8. Білотіл, В.Ю. (2022). Основні теоретичні засади, сучасний стан розвитку та тенденції формування «зеленого» будівництва в Україні в контексті сталого розвитку. *Збалансоване природокористування*, 1, 63-73. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2022.255225>
9. Кривомаз, Т.І., & Савченко, А.М. (2021). Зниження впливу будівельної галузі на кліматичні зміни шляхом впровадження принципів зеленого будівництва. *Екологічна безпека та природокористування*, 37(1), 55–68. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.55-68>
10. Кривомаз, Т.І., & Савченко, А.М. (2021). Адаптація секторів міського розвитку до кліматичних змін. *Екологічна безпека та природокористування*, 38(2), 64–78. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.2.64-78>
11. Кривомаз, Т., Чалий, І., Гамоцький, Р., Ільченко, І., & Циба, А. (2023). Критерії ESG у зеленій відбудові України. *Екологічна безпека та природокористування*, 48(4), 5–20. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.5-20>
12. Feijão, D., Reis, C., & Marques, M. C. (2024). Comparative analysis of sustainable building certification processes. *Journal of Building Engineering*, 96, 110401. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.110401>

References:

1. Ryabchyn, O. (2024). Scenarios of economic recovery of Ukraine: build back better vs business-as-usual. *Actual problems of international relations*, 1(161), 150-167. <https://doi.org/10.17721/apmv.2024.161.1.150-167>

2. Sierdovski, M., Pilatti, L. A., & Rubbo, P. (2022). Organizational competencies in the development of environmental, social, and governance (ESG) criteria in the industrial sector. *Sustainability*, 14(20), 13463. <https://doi.org/10.3390/su142013463>
3. Lorenz, D. & Lützkendorf, T. (2011). Sustainability and property valuation. *Journal of Property Investment & Finance*, 29(6), 644-676. <https://doi.org/10.1108/14635781111171797>
4. Bani-Khaled, S., Azevedo, G. & Oliveira, J. (2025). Environmental, social, and governance (ESG) factors and firm value: A systematic literature review of theories and empirical evidence. *Academy of Marketing Science Review*, 15, 228–260. <https://doi.org/10.1007/s13162-025-00303-2>
5. Battisti, F. (2023). SDGs and ESG criteria in housing: defining local evaluation criteria and indicators for verifying project sustainability using Florence metropolitan area as a case study. *Sustainability*, 15(12), 9372. <https://doi.org/10.3390/su15129372>
6. Lee, S.T. (2023). A battle for foreign perceptions: Ukraine's country image in the 2022 war with Russia. *Place branding and public diplomacy*, 19, 345–358. <https://doi.org/10.1057/s41254-022-00284-0>
7. Delehan, S., Melehanych, H.; Nate, S. (Ed.) (2025). *Environmental and Energy Security on the Way to Rebuilding Ukraine on the Principle of Zero Carbon Footprint. Ukraine's Journey to Recovery, Reform and Post-War Reconstruction. Contributions to Security and Defence Studies.* Springer Cham, 315. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66434-2_14
8. Bilotil, V.Yu. (2022). Basic theoretical principles, current state of development and trends in the formation of "green" construction in Ukraine in the context of sustainable development. *Balanced nature management*, 1, 63-73. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2022.255225>
9. Kryvomaz, T.I., & Savchenko, A.M. (2021). The reducing of construction industry influence on climate change by implementation of green building principles. *Environmental safety and natural resources*, 37(1), 55–68. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.1.55-68>
10. Kryvomaz, T. I., & Savchenko, A. M. (2021). (2021). Adaptation of urban development sectors to climate change. *Environmental safety and natural resources*, 38 (2), 64–78. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.2.64-78>
11. Kryvomaz, T., Chaly, I., Hamotsky, R., Ilchenko, I., & Tsyba, A. (2023). ESG criteria in the green reconstruction of Ukraine. *Environmental safety and natural resources*, 48(4), 5–20. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.5-20>
12. Feijão, D., Reis, C., & Marques, M. C. (2024). Comparative analysis of sustainable building certification processes. *Journal of Building Engineering*, 96, 110401. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110401>.

УДК 504.5

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0616>**¹Олена Жукова,**кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0000-0003-0662-9996>, e-mail: zhukova.og@knuba.edu.ua**¹Павло Старжинський,**аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, <https://orcid.org/0009-0004-4495-9309>, e-mail: starzhynskiy_ps-2023@knuba.edu.ua¹Київський національний університет будівництва та архітектури, просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ УМОВ ТА ФАКТОРІВ ТРАНСФОРМАЦІЇ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

АНОТАЦІЯ. Дослідження присвячене комплексному аналізу трансформації водних об'єктів у контексті сучасних урбанізаційних процесів, зокрема в умовах міського середовища. Автори розглядають основні фактори, що впливають на стан водних ресурсів у містах, зосереджуючись на прикладі Києва, та пропонують стратегії для покращення екологічного стану водойм. У дослідженні детально аналізуються проблеми забруднення водних об'єктів, їхня класифікація за функціональним призначенням, а також наводяться дані щодо динаміки водокористування та рівня забруднення. Запропоновано інноваційний підхід до оцінки впливу міського середовища на водні ресурси, що включає екологічні, соціальні та економічні аспекти. Дослідження також підкреслює важливість інтеграції водних об'єктів у міський простір як складової сталого розвитку та підвищення якості життя мешканців.

Ключові слова: водні об'єкти, урбанізація, антропогенний вплив, екологічний стан, міське середовище, забруднення.

IDENTIFICATION OF KEY CONDITIONS AND FACTORS OF WATER BODY TRANSFORMATION IN URBAN ENVIRONMENTS

ABSTRACT. The research is dedicated to a comprehensive analysis of the transformation of water bodies in the context of modern urbanization processes, particularly in urban environments. The authors consider the main factors influencing the condition of water resources in cities, focusing on the example of Kyiv, and propose strategies for improving the ecological state of water bodies. The study provides a detailed analysis of water pollution issues, their classification by functional purpose, and data on water use dynamics and pollution levels. An innovative approach to assessing the impact of the urban environment on water resources is proposed, which includes ecological, social, and economic aspects. The research also emphasizes the importance of integrating water bodies into the urban space as a component of sustainable development and enhancing the quality of life for residents.

Keywords: water bodies, urbanization, anthropogenic impact, ecological state, urban environment, pollution.

Вступ. За останні десятиліття міське середовище зазнало суттєвого розширення, що супроводжується зростанням промислових зон. За прогнозами науковців, до 2050 року частка міського населення у світі може сягнути 70% [7,8]. В Україні питання організації міського простору є особливо актуальним через історичну забудову, наслідки повномасштабного вторгнення Російської Федерації, необхідність модернізації інженерних комунікацій та розширення лісопаркових зон.

Однією з ключових проблем урбанізованих територій залишається водозабезпеченість. У середній за водністю рік середньостатистичний українець мав у своєму розпорядженні 5,160 тис. м³ прісної води. Проте цей показник суттєво варіюється за регіонами: від 57,352 тис. м³ в Одеській області до 1,143 тис. м³ у Донецькій. Понад 50 тис. м³ водозабезпеченості мали три області: Одеська (57,352), Кіровоградська (53,355) та

Херсонська (52,885 тис. м³). Від 29,697 до 39,519 тис. м³ показник мав у чотирьох областях, від 10,688 до 16,649 тис. м³ - у трьох, а в решті 14 областей його значення було нижчим за 10 тис. м³. У маловодні періоди середній рівень водозабезпеченості знижується на 27,5 %, а понад дві третини ресурсів країни формуються за рахунок транзитного річкового стоку з-за кордону [4].

Більшість великих міст сформувалися в долинах річок, що визначило їхній просторовий розвиток. Однак у процесі урбанізації водні об'єкти зазнали суттєвих трансформацій, зокрема через промислову та житлову забудову. Протягом тривалого часу прибережні території використовувалися для розміщення заводів, портових споруд, складів і транспортних вузлів. Згодом, із розвитком міст і зміною соціально-економічних умов, ці території стали занедбаними й потребують оновлення.

На початку XXI століття змінився підхід до використання міських земель: пріоритет надається комплексному розвитку, інтегрованості та створенню комфортного середовища для мешканців. У багатьох європейських і американських містах успішно реалізуються проекти ревіталізації прибережних територій. Один із наймасштабніших прикладів — Hafep City у Гамбурзі, де з 2001 року триває створення сучасного житлового та громадського простору на місці колишньої портової зони [5,7].

Подібні проекти позитивно впливають на розвиток міського середовища, забезпечуючи його екологічну та соціальну збалансованість. Водночас вони потребують ретельного планування, адже інтенсивна урбанізація може посилювати негативний вплив на природне середовище.

У межах міських територій найпоширенішими водними об'єктами є малі та середні річки, струмки, ставки й озера. Разом із великими річками вони не лише визначають самобутній вигляд міст, а й виконують важливі екологічні, рекреаційні та соціокультурні функції. Саме тому сталий розвиток водних ресурсів є ключовим завданням для сучасної урбаністики.

Мета дослідження. Основною метою дослідження є вивчення трансформації водних об'єктів у міському середовищі, зокрема під впливом урбанізації та антропогенної діяльності, а також розробка стратегій для їхнього відновлення та стабілізації. Дослідження спрямоване на визначення ключових факторів, що впливають на стан водних ресурсів, та розробку комплексних заходів для покращення екологічного стану водойм у містах. Особлива увага приділена інтеграції водних об'єктів у міську інфраструктуру, що сприятиме збереженню біорізноманіття та покращенню якості життя населення. Крім того, дослідження має на меті підвищення обізнаності громадськості щодо екологічних проблем водних ресурсів і залучення її до процесів відновлення та охорони водойм.

Матеріали та результати досліджень. Міське середовище, ландшафти та містобудівний розвиток, а також їхня взаємодія з водними об'єктами значною мірою залежать від умов формування містобудівних природно-техногенних систем. До таких умов належать природно-ландшафтні, екологічні, інженерно-будівельні, транспортні, соціально-економічні, соціокультурні, адміністративні та геополітичні фактори. Сукупність цих параметрів дозволяє сформувати унікальну модифіковану природно-техногенну систему для кожного міського простору, яка відповідає концепції сталого розвитку та сучасним вимогам до формування міського середовища.

Сучасні міські природно-антропогенні водні системи є надзвичайно складними. Вони характеризуються численними якісними й кількісними параметрами, що відображають біологічні, економічні, соціальні, технологічні та техногенні впливи міського середовища. Водночас вони відіграють ключову роль у формуванні водного балансу урбоекосистем [9,10].

Для розробки алгоритму оцінки стану водних об'єктів у міському середовищі першочергово необхідно їх структурувати:

- Основні водотоки та водні об'єкти, які слугують джерелами водопостачання та вздовж яких розташовані міські території.
- Середні та малі водні об'єкти, що зазнають найбільшого антропогенного впливу.

Варто зазначити, що водні об'єкти є одним із найважливіших елементів екологічного каркасу міста. У процесі розвитку міських територій планувальні та функціональні системи адаптувалися до їхньої присутності в просторі та часі. Водні об'єкти відіграють ключову роль у структурі міста, виконуючи різні функції:

- слугують транспортними магістралями,
- їхні набережні є складними гідротехнічними спорудами,
- можуть включати громадські центри, інженерні та берегоукріплювальні споруди,
- сприяють благоустрою та формуванню зелених зон.

Фактори оцінки впливу міського середовища на водні об'єкти. Для аналізу характеру та рівня впливу міського середовища на водні об'єкти необхідно враховувати такі фактори:

- особливості формування міського простору;
- кліматичні умови регіону;
- географічне розташування міста (близькість до водних об'єктів, наявність гідротехнічних споруд, рівень урбанізації);
- стан прибережної зони;
- типологію та класифікацію водних об'єктів;
- геологічні характеристики міста та прибережних територій;
- наявність природно-заповідних територій, парків та інших природних ландшафтів;
- характеристику самих водних об'єктів (зарегульованість, антропогенна трансформація, характер використання тощо);
- здатність водних об'єктів до самоочищення, підтримання біорізноманіття та ін.

На жаль, чинна система нормування якості природних вод не забезпечує ефективного зниження антропогенного навантаження на водне середовище.

Система оцінки забруднення водних об'єктів. Забруднення водних об'єктів зазвичай оцінюється на основі порівняння фактичних концентрацій окремих елементів і речовин із їхніми гранично допустимими концентраціями (ГДК). Проте система ГДК має багаторічну історію й викликає низку дискусій.

ГДК визначаються на основі експериментальних досліджень із тест-організмами. Порогове значення, що викликає видимі відхилення у найчутливіших організмів, приймається за норматив для рибогосподарських водойм. При цьому для більшості речовин нормативи ГДК для рибогосподарських водойм значно жорсткіші, ніж гігієнічні нормативи. Лише у 20% випадків гігієнічні нормативи є нижчими за рибогосподарські, подекуди в 100 і більше разів [11].

Основна проблема використання великої кількості окремих характеристик якості води полягає в громіздкості оцінки. Комплексні показники якості води дозволяють:

- проводити єдину оцінку чистоти води в різних регіонах і в різні періоди часу;
- визначати речовини, що роблять найбільший внесок у загальне забруднення води.

Незважаючи на переваги такого підходу, досі не розроблено універсального комплексного показника, що враховував би якість природних вод різних типів. Від 1970-х років створено близько 30 різних методик оцінки якості води, однак кожна з них має свою сферу застосування. Це значно ускладнює процес нормування якості водних ресурсів у різних регіонах.

Проблеми гідрохімічного моніторингу. Однією з основних проблем гідрохімічного моніторингу є точне визначення компонентного складу природних вод. З урахуванням усіх зазначених факторів можна виокремити ключові умови та чинники міського середовища, що негативно впливають на водні об'єкти (табл. 1).

При більш детальному розгляді кожного з факторів трансформації водних об'єктів в умовах міського середовища основний акцент необхідно зробити на забезпечення безпечного та екологічно сталого, просторово та функціонально розвинутого для населення середовища, що дозволить покращити умови життєдіяльності та зменшити негативний вплив на навколишнє середовище. В даному випадку на заміну звичних галузевих факторів та параметрів варто віддати перевагу показникам, які будуть характеризувати саме міське трансформоване середовище, адже комфорт та екологічність сучасного міста є важливим

елементом формування здоров'я орієнтованого на дотримання основних постулатів сталого розвитку (табл. 2).

Таблиця 1. Умови та фактори впливу міського середовища на водні об'єкти
Table 1. Conditions and factors of influence of the urban environment on water bodies

Умови формування	Фактори впливу міського середовища на водні об'єкти
Соціальні та культурні	<ul style="list-style-type: none"> - Просторове планування міського середовища та інтеграція водних об'єктів. - Доступність та благоустрій прибережних зон. - Використання водних об'єктів для рекреації та культурних заходів. - Можливості адаптації водних об'єктів до змін у міському середовищі.
Соціально-економічні	<ul style="list-style-type: none"> - Наявність промислових і виробничих підприємств поблизу водних об'єктів. - Транспортна доступність і інвестиційна привабливість території. - Використання водних об'єктів для господарських потреб міста.
Інженерно-будівельні	<ul style="list-style-type: none"> - Вплив міської забудови на водний баланс і гідрологічні процеси. - Особливості ландшафтної структури та геологічних умов. - Гідроморфологічні характеристики водних об'єктів.
Природно-ландшафтні	<ul style="list-style-type: none"> - Вплив рельєфу, ландшафту та клімату на стан водних об'єктів. - Гідроморфологічні особливості та зміни внаслідок урбанізації. - Просторова доступність водних об'єктів.
Екологічні	<ul style="list-style-type: none"> - Антропогенний вплив (промисловість, стоки, рекреаційне навантаження). - Самоочисні властивості водних об'єктів та рівень забруднення. - Включеність водного об'єкта до природоохоронних програм.
Транспортні	<ul style="list-style-type: none"> - Доступність водного об'єкта для транспортних потреб. - Використання водного транспорту та вплив на екосистему водойм.

Річка Дніпро – одна з найбільших річок Європи та територіально знаходиться в центральній частині міського середовища багатьох міст, серед яких місто Київ. Р. Дніпро має звивисте річище та утворює рукав з багатьма перекатами, островами, протоками [1-4].

На території міста також розташовано ряд інших, менших за розмірами річок, серед яких [1-3]:

Річка Либідь, довжина якої становить 16,8 км, площа водозабору 67,8 км². Висота витоку над рівнем моря 185 м, гирла – 91,5 м. частина річки розташована на поверхні, частина під землею у колекторі. Найбільшими притоками Либіді є р. Совка, р. Горіхуватка, р. Клов та ін.

Таблиця 2. Фактори трансформації водних об'єктів, адаптовані до умов міського середовища
Table 2. Transformation factors of water bodies adapted to urban conditions

Умови трансформації	Фактори впливу, адаптовані до міського середовища
Просторово-функціональні	<ul style="list-style-type: none"> - Інтеграція водних об'єктів у міську забудову та рекреаційні зони. - Доступність та зручність використання прибережних зон для населення. - Вплив інфраструктурних об'єктів (мости, дороги, колектори).
Екологічні	<ul style="list-style-type: none"> - Рівень забруднення вод (побутові, промислові, зливові стоки). - Самоочисний потенціал водних об'єктів. - Наявність природоохоронних заходів та екосистемних сервісів. - Зарегульованість річок (дамби, водосховища, гідроспоруди).
Гідрологічні	<ul style="list-style-type: none"> - Зміни рівня води внаслідок міської забудови та змін клімату. - Гідроморфологічні особливості (звивистість, наявність рукавів, островів, перекатів). - Вплив штучного регулювання річкового стоку.
Антропогенно-техногенні	<ul style="list-style-type: none"> - Урбанізація та зміна природних берегових ліній. - Вплив транспортної інфраструктури (мости, набережні, метро). - Викиди промислових підприємств та каналізаційні скиди.

Соціальні та рекреаційні	- Рекреаційне навантаження (пляжі, прогулянкові зони, водний транспорт). - Роль водних об'єктів у формуванні здорового міського середовища. - Громадська участь у збереженні водних ресурсів.
--------------------------	---

Річка Дарниця найбільша річка в лівобережній частині міста. Її довжина становить 21,3 км, площа водозбору 194 км².

Річка Борщагівка (Нивка) довжина становить 24 км, площа водозбору -99,8 км². Річка має два витoki: один за 400 м від Одеської площі, а інший на південний захід від площі, на території інституту ПММС НАНУ, практично на межі міста. Існування річки «видають» три ставки, що створені на житловому масиві Теремки II.

Річка Сирець довжина становить 9,5 км, площа водозбору 23,2 км². Річка тече в західній частині Києва переважно з південного заходу на північний схід у напрямку Дніпра. Сирець має кілька витоків. Головним є той, що розташований між станціями метро «Нивки» і «Святошин».

Річка Віта тече на південній околиці Києва, переважно за межами міської території. Довжина становить 13,9 км, площа водозбору 244 км². За площею водозбору це найбільша мала річка Києва.

Річки Горенка і Котурка протікають у північно-західній частині міста, з обох сторін охоплюючи Пущу-Водицю. Особливістю обох річок є, що вони мають значний похил. Нині на обох річках створено кілька великих і глибоких ставків. На річці Котурка можна виділити озеро Горошиха, довжиною 1,2 км, на березі якого влаштований пляж «Пуща-Водиця».

Річка Глибочиця по всій своїй довжині протікає під землею. Колектор, в якому тече річка, бере початок з вул. Овруцької.

Київ забезпечується питною водою з трьох джерел водопостачання річок Дніпра, Десни та підземних водоносних горизонтів. Артезіанський водопровід експлуатує свердловини сеноман келовейського та середньоюрського водоносних горизонтів, глибиною від 90 до 340 м.

Для міської системи м. Київ характерна велика кількість водних об'єктів за походженням та призначенням, які підпадають під суттєвий антропогенний вплив, що проявляється у погіршенні якості води, зміні гідрологічного режиму, зменшення біорізноманіття. Така ситуація призводить до незворотної деградації водотоків [4].

Класифікація водних об'єктів м. Києва за способом користування:

- рекреаційні – водойми, що використовуються для відпочинку, купання, занять спортом (Дніпро, Оболонська затока, озера Голосіївського парку тощо).
- рибогосподарські – водойми, що мають значення для розведення або вилову риби (Русановська протока, окремі затоки Дніпра, деякі озера на Осокорках).
- декоративні – штучні або природні водойми, що виконують естетичну функцію (фонтанні комплекси, ставки у парках, наприклад, в Маріїнському парку).
- технічні – водойми, що використовуються для господарських чи промислових потреб (охолоджувальні ставки ТЕЦ, водосховища Київської ГЕС).

Зарегульовані природні водотоки – малі річки, які змінили свій природний режим через урбанізацію (Либідь, Сирець, Дарниця).

Всього за результатами інвентаризації налічується 691 водний об'єкт. Площа їх водного дзеркала коливається від 0,0025 до 1,86 км², об'єми – 0,003-19,3 млн. м³. Середня глибина – від 0,85 до 15 м, максимальна – від 1,85 до 28 м. Для кожної водойми характерні свої гідрологічні характеристики та антропогенне навантаження різного ступеня інтенсивності. Протяжність річок по території міста складає 104,28 км.

Місту Києву характерна надзвичайна протяжність прибережної смуги водних об'єктів, що є наслідком великої кількості проток, островів та інших водойм.



Рис.1. Карта розміщення водойм м. Київ [12]
 Fig. 1. Map of the location of water bodies in Kyiv [12]

У межах Києва налічується більше 70 невеликих річок та струмків, серед яких: Афанасьєвський, Кирилівський, Паньківський, Звіринецький, Батіїв, Китаївський, Пісчаний, Золоча, Білий, Киянка, Петиль, Йорданський, Борисоглібський, Клов, Позняківка, Кадетський Гай, Бусловка, Кловиця, Половиця, Калинівка, Биковщинський, Коноплянка, Почайна, Кам'янка, Вершинка, Котурка, Протасів Яр, Мушинка, Віта, Хрещатик, Прудок, Новодницький, Волочаївський, Хрещатицький, Радунь, Нивка, Гвоздовка, Кудрявець, Реп'яхів Яр, Обліпихова, Глибочиця, Курячий Брід, Рогостинка, Оріховатка, Гнилуша, Луга, Рубежівський, Відрадний, Голосіївський, Лукрець, Святошинський, Панкратіївський, Горенка, Либідь, Сетомль, Тельбін, Дарницький меліоративний канал, Любка, Скоморох, Турець, Желань, Марічанка, Совка, Хотівський, Живець, Мокра, Страковка, Шулявка, Западінський, Ямка, Сирець, Юрковиця. Найбільшими малими річками Києва, що течуть на території міста та впадають у Дніпро, є Либідь, Сирець, Нивка і Віта в правобережній частині столиці, а також Дарниця – в лівобережній.

Також в акваторії Дніпра у межах Києва існує декілька великих заток: Верблюд, Собаче Гирло, Оболонь, Доманя, Матвіївська, а також островів: Венеціанський, Муромець, Труханів, Долобецький, Жуків, Великий та ін.

Згідно з генетичною класифікацією, водойми Києва поділяються на чотири типи: озера, що генетично пов'язані з заплавою р. Дніпра (Бабине, Тельбін, Вирлиця та ін.); озера-стариці історичних русел річок (до водойм цього типу належить каскад озер Опечень); стави на постійно існуючих та пересихаючих водотоках (на річках Нивка, Горенка, Сирець та ін.); безстічні озера (Синє, Центральне, Глинка) (рис. 1).

Динаміка водокористування водойм м. Києва його основних водокористувачів, кількість зворотних вод та забруднюючих речовин, що потрапляють у поверхневі водні об'єкти разом із зворотними водами представлені в (табл. 3, табл. 4 та табл. 5)[1-3].

Відповідно до статистичних даних загальна площа міста Києва становить 836 км², з них 4,6 тис. га (6%) – землі сільськогосподарського призначення; 35,1 тис. га (42%) – ліси та

інші лісовкриті площі; 36,7 тис. га (44,0%) – під житловою забудовою; 3,3 тис. га (4%) – землі промисловості; під водою 6,5 тис. га (8%) (рис.2.).

Землекористування водного фонду в межах м. Київ характеризується природними річками і протоками 5,1 тис. га (6,1%) та озерами і ставками 1,3 тис. га (1,3%) [5].

Останніми роками реалізовано низку проєктів, спрямованих на відновлення та покращення екологічного стану водних об'єктів міста, їхню реконструкцію та комплексний благоустрій прилеглих територій. Основними напрямками розвитку цих територій є:

- підвищення їхньої містобудівної ролі;
- формування нових зон міської активності;
- зменшення негативного впливу міського середовища на здоров'я населення;
- підвищення рекреаційного потенціалу.

Таблиця 3. Динаміка водокористування

Table 3. Dynamics of water use

Показники	Одиниця виміру	2021 рік	2022 рік	2023 рік
Забрано води з природних джерел, усього	млн. м ³	563	511,139	526,298
у тому числі: поверхневої	млн. м ³	-	492,107	503,916
підземної	млн. м ³	-	19,032	22,382
морської	млн. м ³	-	-	-
Використано свіжої води, усього	млн. м ³	499	452,732	458,943
у тому числі на потреби:				
питні і санітарно-гігієнічні	млн. м ³	130	97,849	101,57
виробничі	млн. м ³	369	354,84	357,29
зрошення	млн. м ³	-	0,002	0,001
Втрачено води при транспортуванні	млн. м ³	-	46,818	50,258
	% до забраної води	-	9,0	9,5
Скинуто зворотних вод, усього	млн. м ³	580	523,856	534,351
Скинуто зворотних вод, у поверхневих водних об'єктах, усього	млн. м ³	580	523,798	534,240
з них:				
нормативно очищених, усього	млн. м ³	212,578	212,578	229,334
у тому числі:				
на спорудах біологічного очищення	млн. м ³	-	212,457	229,334
на спорудах фізико-хімічного очищення	млн. м ³	-	0,05	0,03
на спорудах механічного очищення	млн. м ³	-	0,115	0,147
нормативно чистих без очистки	млн. м ³	296	295,992	291,826
забруднених, усього	млн. м ³	16	15,228	12,932
у тому числі:				
недостатньо очищених	млн. м ³	-	-	-
без очищення	млн. м ³	16	15,228	12,932

Таблиця 4. Кількість зворотних вод, які виникають внаслідок діяльності основних водокористувачів
 Table 4. Amount of return water resulting from the activities of major water users

Найменування водокористувача-забруднювача	Наявність, потужність (м³/добу), ефективність використання (використання потужності) очисних споруд	2021 рік			2022 рік			2023 рік		
		тис.м³	тис.м³	т	тис.м³	тис.м³	т	тис.м³	тис.м³	т
		об'єм скидання зворотних вод	у тому числі об'єм скидання забруднених зворотних вод	кількість забруднюючих речовин, що скидаються разом із зворотними водами	об'єм скидання зворотних вод	у тому числі об'єм скидання забруднених зворотних вод	кількість забруднюючих речовин, що скидаються разом із зворотними водами	об'єм скидання зворотних вод	у тому числі об'єм скидання забруднених зворотних вод	кількість забруднюючих речовин, що скидаються разом із зворотними водами
ПрАТ «АК «КІЇВВОДОКАНАЛ»	Наявні, 657000000 м³/добу, 32%	285315	16259	58132,57	227700	15220	50693,89	243422	12930	55026,60

Таблиця 5. Кількість забруднюючих речовин, які потрапляють у поверхневі водні об'єкти разом із зворотними водами

Table 5. Amount of pollutants entering surface water bodies with return waters

Забруднююча речовина, що скидається разом із зворотними водами	2021 рік	2022 рік	2023 рік
	обсяг забруднюючих речовин, тис. т	обсяг забруднюючих речовин, тис. т	обсяг забруднюючих речовин, тис. т
Азот амонійний	2,0212	1,4492	1,9999
БСК5	1,8802	1,7186	2,4758
Завислі речовини	2,7809	2,6168	2,8083
Нітрати	10,1782	8,7645	8,4781
Нітрити	0,5094	0,4503	0,6876
Сульфати	11,1461	7,6044	8,9435
Сухий залишок	-	1,6588	2,3449
Хлориди	20,0074	17,7396	20,3107
ХСК	7,9173	7,1964	9,4179
Залізо	0,07109	0,06708	0,0682921
Нафтопродукти	0,0169147	0,009890	0,0181033
АСПАР	0,0107034	0,0074746	0,0081101
Фосфати	1,5910003	1,4108477	0,798397

Землекористування водного фонду в межах м. Київ характеризується природними річками і протоками 5,1 тис. га (6,1%) та озерами і ставками 1,3 тис. га (1,3%) [5].

Останніми роками реалізовано низку проєктів, спрямованих на відновлення та покращення екологічного стану водних об'єктів міста, їхню реконструкцію та комплексний благоустрій прилеглих територій. Основними напрямками розвитку цих територій є:

- підвищення їхньої містобудівної ролі;
- формування нових зон міської активності;
- зменшення негативного впливу міського середовища на здоров'я населення;
- підвищення рекреаційного потенціалу.

Довжина міського середовища вздовж берега р. Дніпро становить понад 20 км.

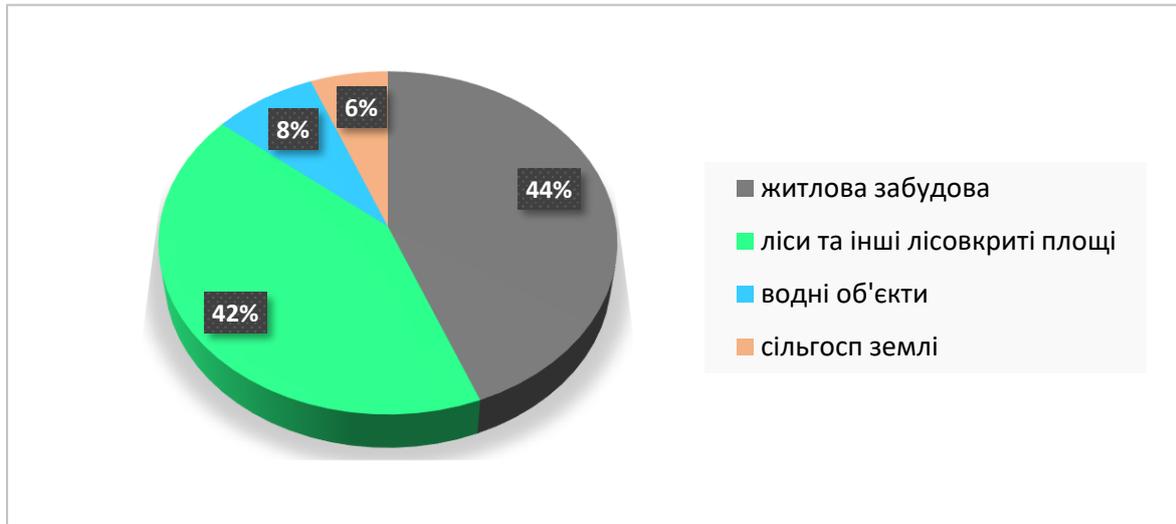


Рис.2. Земельний фонд м. Києва

Fig. 2. Land fund of Kyiv

Значний вплив на стан водних об'єктів у межах міської екосистеми спричиняє забруднення, зокрема механічне. До основних негативних факторів впливу міського середовища на водні ресурси належать:

- забруднення водойм та водотоків нафтопродуктами;
- забруднення хлорвмісними речовинами та солями;
- забруднення поверхнево-активними речовинами (ПАР), які містяться в миючих засобах;
- забруднення іонами важких металів;
- забруднення нітратами та нітритами.

Слід відмітити, що всі вище перелічені речовини-ксенобіотики мають здатність до накопичення в трофічних ланцюгах та сприяє зниженню кількості біорізноманіття, погіршенню якісних характеристик водотоку.

Висновки. Формування екологічно безпечної модифікованої системи «міське середовище – водні об'єкти – людина» потребує розробки комплексу заходів, спрямованих на покращення екологічного стану водойм, відновлення їхньої інфраструктури та дотримання принципів сталого розвитку. У межах дослідження запропоновано такі заходи:

- комплексна оцінка впливу міського середовища на стан водних об'єктів та удосконалення системи реконструкції забудови поблизу водойм;
- проведення організаційних заходів, спрямованих на оздоровлення довкілля;
- екопросвітницька робота з громадськістю для підвищення рівня екологічної свідомості;
- збільшення площ озеленення територій поблизу водойм;
- облаштування зон рекреації на відповідних ділянках.

Список використаних джерел:

1. Екологічний паспорт м. Київ за 2023 рік.
2. Екологічний паспорт м. Києва. 2020.
3. Екологічний паспорт міста Києва. 2022.
4. Водна стратегія міста Києва на 2018–2025 рр. КП «ПЛЕСО». Київ, 2019. 106 с.
5. Державний земельний кадастр: форма 6-зем станом на 01.01.2016 р. К.: Держгеокадастр України, 2016.
6. Ковалишин О.Ф. Економічні та екологічні відносини власності на землю: теорія, методологія і практика. Дис. на здоб. наук. ст. докт. наук. К.: 2020. 478 с.
7. Lees L., Slater T., Wyly E. Gentrification – New York. 2008. 344 pp. <https://doi.org/10.4324/9780203940877>.
8. Campo D., Ryan B.D. The entertainment zone: Unplanned nightlife and the revitalization of the American. *Journal of Urban Design*. 2008. №13 (3). 291–315.
9. Негода Н.В., Жукова О.Г., Кордуба І.Б. Екологічні аспекти оцінки стану урбоєкосистем та здоров'я населення. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук*. 2024. – Вип. 3 (146). С. 66-72.
10. Негода Н.В., Жукова О.Г., Кордуба І.Б. Вразливість міст до кліматичних змін та методологія оцінки їх вразливості. *Захист і відновлення екологічної рівноваги та забезпечення самовідновлення екосистем: колективна монографія; за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава: Видавництво ПП «Астрыя», 2023. С. 242-250.*
11. Осадчий В.І., Набиванець Б.Й., Осадча Н.М., Набиванець Ю.Б. Гідрохімічний довідник: Поверхневі води України. Гідрохімічні розрахунки. Методи аналізу. К.: Ніка-Центр, 2008. 656 с.
12. Басейнове управління водних ресурсів середнього Дніпра. Державне агентство водних ресурсів України <https://buvrd.gov.ua/vodni-resursy/>.

References:

1. Ecological Passport of Kyiv for 2023.
2. Ecological Passport of Kyiv. 2020.
3. Ecological Passport of Kyiv. 2022.
4. Water Strategy of Kyiv for 2018-2025. KP "PLESO". Kyiv, 2019. 106 p.
5. State Land Cadastre: form 6-land as of 01.01.2016. Kyiv: StateGeoCadastre of Ukraine, 2016.
6. Kovalyshyn O.F. Economic and Ecological Property Relations on Land: Theory, Methodology and Practice. Doctoral dissertation. Kyiv, 2020. 478 p.
7. Lees L., Slater T., Wyly E. Gentrification – New York, 2008. 344 pp. <https://doi.org/10.4324/9780203940877>.
8. Campo D., Ryan B.D. The Entertainment Zone: Unplanned Nightlife and the Revitalization of the American City. *Journal of Urban Design*, 2008. №13 (3). 291–315.
9. Negoda N.V., Zhukova O.G., Korduba I.B. Ecological Aspects of Urban Ecosystems and Population Health Assessment. *Bulletin of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. Kremenichuk*, 2024. Issue 3 (146). 66-72.
10. Negoda N.V., Zhukova O.G., Korduba I.B. Cities' Vulnerability to Climate Change and Methodology for Assessing their Vulnerability. *Environmental Balance Protection and Restoration and Ecosystem Self-Recovery: Collective Monograph; edited by T.O. Chaika. Poltava: Astra Publishing House, 2023. 242-250.*
11. Osadchyi V.I., Nabyvanets B.Y., Osadcha N.M., Nabyvanets Yu.B. Hydrochemical Handbook: Surface Waters of Ukraine. Hydrochemical Calculations. Methods of Analysis. Kyiv: Nika-Center, 2008. 656 p.
12. Basin Management of Water Resources of Middle Dnipro. State Water Resources Agency of Ukraine <https://buvrd.gov.ua/vodni-resursy/>.

Наукове видання

ТЕХНІКА БУДІВНИЦТВА

Збірник наукових праць

Випуск 43

Підписано до друку 26.12.2025

Умовн. друк. арк. 14

Формат 60×84 1/8

Обл.-вид. арк. 12.5

Папір офсетний. Друк різогр.

Тираж 100. Зам. №

Адреса редакції: 03037, м. Київ, просп. Повітряних сил, 31, кім.603А.
Тел. +38 044 241-5548, e-mail: tehbud@knuba.edu.ua