

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

# *Техніка будівництва*

*Збірник наукових праць*



*Construction Engineering*

*Collection of scientific works*

**41, 2024**



# Construction Engineering

# Техніка будівництва

Collection of  
scientific works

Збірник  
наукових праць

Issue 41

Випуск 41

2024

2024

*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

**Засновники:** 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.І., 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 № 27 від 29.11.2024 р.

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

**Адреса редакції:** 03037, м. Київ, проспект Повітряних сил України, 31, кім.6036.  
тел. +38 044 241-5548, e-mail: tehbud@knuba.edu.ua

Редактор Дьяченко О.С.

Комп'ютерна верстка Слюсар В.С.

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, 2024

---

## ЗМІСТ

<i>Галузеве машинобудування</i> .....	4
<b>Іван Назаренко, Олег Дєдов, Олександр Дьяченко, Євген Міщук, Микола Ручинський, Сергій Орищенко, Володимир Слюсар, Валерій Яковенко</b> Методи розрахунку параметрів поверхневих вібраційних машин для ущільнення будівельних сумішей .....	4
<b>Андрій Запривода</b> Методи розрахунку параметрів поверхневих вібраційних машин для ущільнення будівельних сумішей.....	12
<b>Євген Міщук</b> Огляд конструкцій та оцінка технологічних і конструктивних параметрів дробильного обладнання будіндустрії .....	22
<b>Володимир Слюсар</b> Методика експериментального дослідження розподілу енергії в елементах системи «вібраційна машина – ущільнююча бетонна суміш».....	40
<b>Коробко Богдан, Левченко Олександр</b> Оптимізація роботи приймального бункера під час склепіння сипких матеріалів .....	47
<b>Нестеренко Микола</b> Врахування сил опору середовища в загальній розрахунковій схемі вібраційної системи, зображеної у вигляді дискретної моделі .....	56
<b>Ігор Косминський</b> Особливості викладання дисципліни "Методика наукових досліджень" для магістрів спеціальності "Галузеве машинобудування" .....	63
<b>Андрій Задорожний, Юрій Човнюк, Петро Чередніченко, Ганна Васильєва, Марія Биваліна</b> Оптимізація динамічних режимів руху будівельних механізмів і (гусеничних) машин з урахуванням лінійного опору, пропорційного швидкості переміщення.....	68
<b>Rudyk Rostyslav, Salnikov Roman</b> Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency .....	77
<b>Victor Nechyporuk</b> Research on the parameters and characteristics of road equipment failures .....	85
<b>Микола Клименко, Олександр Дьяченко, Василь Марач</b> Методи забезпечення якості при контролі параметрів з'єднань машин промисловості будівельних матеріалів.....	92
<i>Технологія захисту навколишнього середовища</i> .....	99
<b>Ігор Сатін, Сергій Хитрук, Олена Панченко</b> Визначення норм надання послуг з вивезення побутових відходів для населених пунктів Вараської міської територіальної громади .....	99
<b>Валерій Фролов, Світлана Маджд, Анастасія Ковальова</b> Наукові технології контролю стану донних відкладень, як індикатора рівня екологічної небезпеки гідроекосистем.....	108
<b>Olena Zhukova, Negoda Nazariy</b> Determination of cause-consequential changes in the mechanism of biotic self-regulation of water bodies by urboecosystems (on the example of the city of kyiv, ukraine).....	116
<b>Володимир Ващенко, Ірина Кордуба, Цибитовський Сергій</b> Ядерно-екологічна безпека зберігання відпрацьованого ядерного палива та поводження з ним .....	128

## Галузеве машинобудування

УДК 658.7

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0401>

### **Іван Назаренко,**

доктор технічних наук,  
професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1888-3687>,  
E-mail: [nazarenko.ii@knuba.edu.ua](mailto:nazarenko.ii@knuba.edu.ua),

### **Олег Дєдов,**

доктор технічних наук,  
доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5006-772X>,  
E-mail: [diedov.op@knuba.edu.ua](mailto:diedov.op@knuba.edu.ua),

### **Олександр Дьяченко,**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри Машин і обладнання технологічних процесів,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8199-2504>,  
E-mail: [diachenko.os@knuba.edu.ua](mailto:diachenko.os@knuba.edu.ua),

### **Євген Міщук,**

доктор філософії в галузі технічних наук,  
доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7850-0975>,  
E-mail: [mischuk.ieo@knuba.edu.ua](mailto:mischuk.ieo@knuba.edu.ua),

### **Микола Ручинський,**

кандидат технічних наук,  
професор кафедри Машин і обладнання технологічних процесів,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9362-292X>,  
E-mail: [ruchynskyi.mm@knuba.edu.ua](mailto:ruchynskyi.mm@knuba.edu.ua),

### **Сергій Орищенко,**

доктор філософії в галузі технічних наук,  
доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5359-5285>,  
E-mail: [oryschenko.sv@knuba.edu.ua](mailto:oryschenko.sv@knuba.edu.ua),

### **Володимир Слюсар**

аспірант,  
асистент кафедри машини і обладнання технологічних процесів,

Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4332-3144>,  
E-mail: [sliusar.vs@knuba.edu.ua](mailto:sliusar.vs@knuba.edu.ua),

**Валерій Яковенко**,  
доктор технічних наук,  
професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8759-8652>,  
E-mail: [iakovenko.vb@knuba.edu.ua](mailto:iakovenko.vb@knuba.edu.ua),

## НАУКОВІ АСПЕКТИ ОБГРУНТУВАННЯ ІНЖЕНЕРІЇ ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМ БУДІВНИЦТВА В РАМКАХ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА»

***Анотація** В статті наведені результати обґрунтування місця та визначення машин і процесів будівельної індустрії, об'єднаних у відповідності до спеціалізації інженерія логістичних систем спеціальності прикладна механіка. Здійснено аналіз існуючих визначень словосполучення «логістична система» із оцінкою терміну «система» в контексті інженерії логістичних систем машин і процесів будівельної індустрії. Обумовлено це тим, що логістичні системи вкладаються у загальноприйняте поняття «системи», бо складаються із системоутворюючих елементів, тісно взаємопов'язаних і взаємозалежних між собою, які мають впорядковані зв'язки й утворюють певну структуру із заздалегідь заданими властивостями. Саме такими являються більшість схем, що реалізують потоки матеріалів при подрібненні, сортуванні, перемішуванні, укладанні та ущільненні.*

***Ключові слова:** прикладна механіка, логістична система, інженерія, машини, властивості, енергетичні та масові потоки, параметри.*

## SCIENTIFIC ASPECTS OF SUBSTANTIATION OF ENGINEERING OF LOGISTICS SYSTEMS OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY WITHIN THE FRAMEWORK OF THE SPECIALTY "APPLIED MECHANICS"

***Abstract** The article presents the results of substantiating the place and definition of machines and processes of the construction industry, united in accordance with the specialization of logistics systems engineering of the specialty of applied mechanics. An analysis of existing definitions of the phrase "logistics system" was carried out with an assessment of the term "system" in the context of engineering of logistics systems of machines and processes of the construction industry. This is due to the fact that logistics systems are included in the generally accepted concept of "system", because they consist of system-forming elements, closely interconnected and interdependent with each other, which have ordered connections and form a certain structure with predetermined properties. Most of the schemes that implement material flows during crushing, sorting, mixing, stacking and compaction are of this type.*

***Keywords:** applied mechanics, logistics system, engineering, machines, properties, energy and mass flows, parameters.*

**1. Вступ.** Логістичні системи є поширеними як за визначенням так і застосуванням в багатьох галузях, які є динамічними і цілеспрямованими. Тому в спеціалізації інженерія логістичних систем спеціальності прикладна механіка є важливим науковим напрямком їх застосування на основі аналізу й синтезу та створення ефективних керованих систем будівельної індустрії.

**2. Аналіз існуючих визначень «логістична система» та їх застосування.** Існує низка визначень поняття, що являє собою логістична система. Формування понять «логістична система» займалися вітчизняні та закордонні фахівці [1,2,4-9] Це: А.М. Гаджинський, М.П. Денисенко, Є.В. Крикавський, Н.В. Чернописька, В.С. Лукинський, Н.Г. Метеленко, В.І. Сергеев, О.М. Трідід та іноземні фахівці: Д.Дж. Бауерокс і Д.Дж. Клос та інші. Словосполучення «логістична система» складаючись із двох термінів: логістична і система, потребує змістов-

ного аналізу цих термінів для з'ясування не тільки природи їх утворення, а і виявлення особливостей застосування. Сталим, наведеним в енциклопедії визначенням, є наступне формулювання: логістична система — адаптивна система із зворотним зв'язком, що виконує ті чи інші логістичні функції та операції, складається, переважно, з декількох підсистем і має досить розвинуті зв'язки із зовнішнім середовищем. Адаптивна система (система, що сама пристосовується) — система, що автоматично змінює алгоритми свого функціонування і (іноді) свою структуру з метою збереження або досягнення оптимального стану при зміні зовнішніх умов. Ці два визначення наближає до думки про можливість застосування терміну «логістична система» від великої кількості математичного опису керованих систем до кібернетичних систем, в тому числі конструкцію електромагнітного вібромайданчика[3]. Так, тому що за характером змін у керуючому пристрої адаптивні системи поділяють на: самоналаштовані (змінюються тільки значення параметрів регулятора) та самоорганізовані (змінюється структура самого регулятора). Таких прикладів можна навести із будь якої галузі народного господарства. Отже є всі підстави вважати, що в рамках спеціальності «прикладна механіка» логістична система має право на використання до визначення певних пристроїв і комплекту машин, що і є предметом даних досліджень.

**3. Викладення основного матеріалу.** Логістичні системи вкладаються у загальноприйняте поняття «системи», бо складаються із системо утворюючих елементів, тісно взаємопов'язаних і взаємозалежних між собою, які мають впорядковані зв'язки й утворюють певну структуру із задалегідь заданими властивостями. Вона, як правило, складається з декількох підсистем і має розвинені зв'язки між собою або із зовнішнім середовищем. В першому випадку логістичну систему можна розглядати як машину, механізм, засоби механізації, роботи та маніпулятори. комплекти машин, а в другому – промислове підприємство, лінії виробництва будівельних матеріалів тощо. Логістичні системи поділяють на макро- і мікрологістичні. Макрологічна система – це система, що складається із комплекту машин, якими необхідно здійснювати відповідне управління їхньою роботою в заданому технологією процесі виконання робіт, технологічна лінія зібрання тої чи іншої конструкції машини, або інша система управління матеріальними потоками, що охоплює підприємства і організації промисловості. Мікрологістичні системи є підсистемами, структурними складовими макрологістичних систем. До них відносяться різні збірні одиниці машин: приводи, системи керування робочими органами машин. Любій логістичній системі притаманні наступні властивості:

- цілісність і здатність до розділення – система є цілісна сукупність елементів, що взаємодіють один з одним;
- між елементами логістичної системи є суттєві зв'язки, які з закономірною необхідністю визначають інтегративні якості;
- зв'язки між елементами логістичної системи певним чином впорядковані, тобто логістична система володіє певною організацією своєї роботи;
- логістична система володіє інтегративними якостями, не властивими жодному з елементів окремо. Формування машинобудівного підприємства як логістичної системи в інтеграційному логістичному середовищі із чітко визначеними як внутрішніми так і зовнішніми зв'язками, є запорукою досягнення значного синергічного ефекту логістичної інтеграції.

#### **4. Основи формування логістичних систем будівельної індустрії.**

**4.1. Розробка принципів формування логістичних систем.** В основі рішення покладені методи прогнозування, методологія системного аналізу, кібернетичний підхід, фізико-математичне моделювання. Важливість прогнозування логістичних систем зумовлена тенденціями розвитку цих систем: можливі використання нових розробок (роботів, маніпуляторів), поява нових альтернатив вирішення проблем, застосування нових більш надійних і дешевих матеріалів при створенні машин і обладнання, як підсистем логістичних систем. Здійснюється прогнозування в наступній послідовності:

- визначення об'єкта прогнозування та його параметрів;
- обґрунтування критеріїв оцінки та моделей прогнозування;



- результати прогнозу.

Методологія системного аналізу базується на досягненні як класичних галузей науки (математика, фізика, механіка та ін.), так і неklasичних областей (синергетика, інформатика, теорії нелінійної динаміки й динамічного хаосу, катастроф). Спільний взаємовплив техніки і сучасної технології збагачує системний аналіз новими методами, моделями, середовищами.

Кібернетичний підхід передбачає вивчення процесів управління, розгляд елементів системи, в тому числі за допомогою виявлення прямих та обернених зв'язків.

Фізико-математичне моделювання базується на досягненні основних положень класичної механіки та теорії суцільних середовищ. Побудова моделей для проектування логістичної системи полягає (рис.1) в уявленні фізики робочих процесів та інтерпретації їх у математичній формі[10].

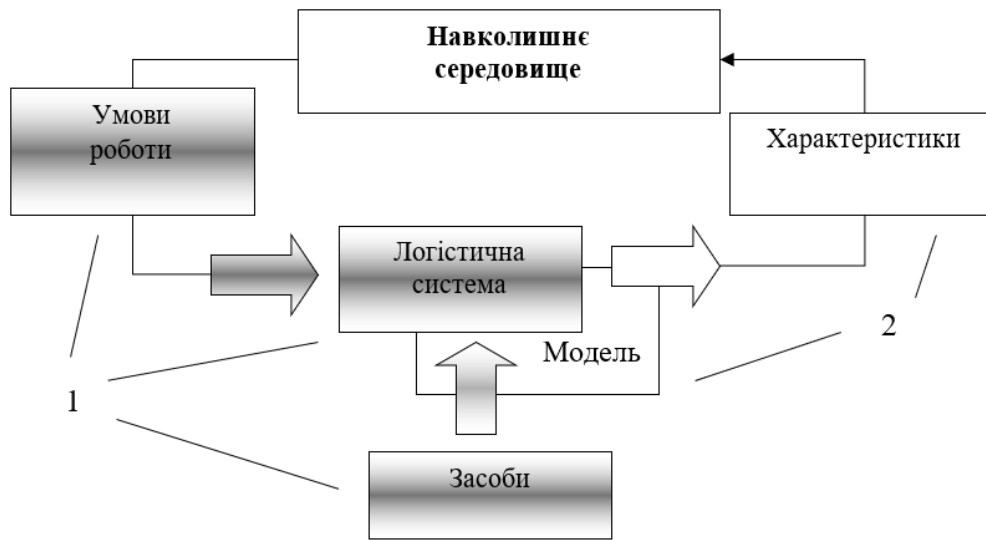


Рис. 1. Схема завдання з моделювання логістичної системи:  
1 – відомі дані; 2 – обумовлені дані.

Fig. 1. Schematic of the task of modeling a logistics system:  
1 – known data; 2 – conditional data

Принципи формування синергетичної логістичної системи приведено на рисунку 2.

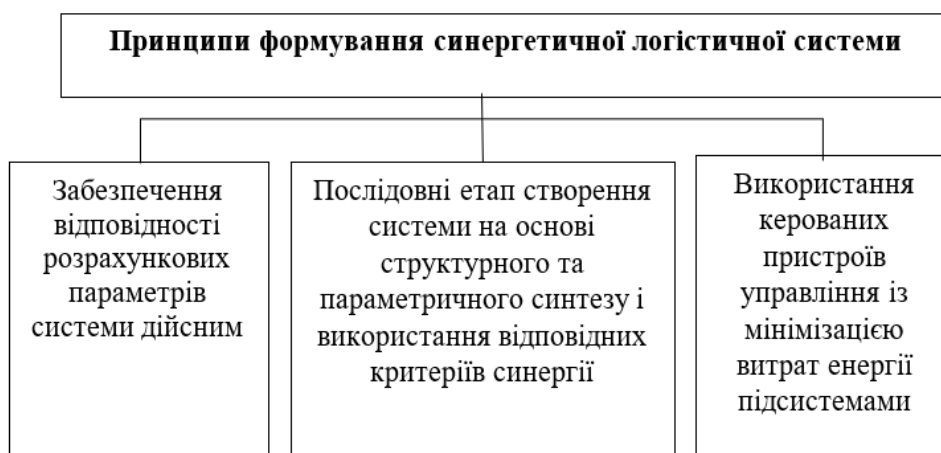


Рис.2. Принципи формування логістичної системи

Fig. 2. Principles of forming a logistics system

#### 4.2. Приклади логістичних систем будівельної індустрії.

#### 4.2.1. Структурна схема машини, як логістичної системи.

На рисунку 3 наведено загальну структурну схему машини для обробки матеріалів. За структурою машина, як система складається з ряду підсистем, тобто пристроїв, призначених для виконання певних технологічних операцій і функцій [11].

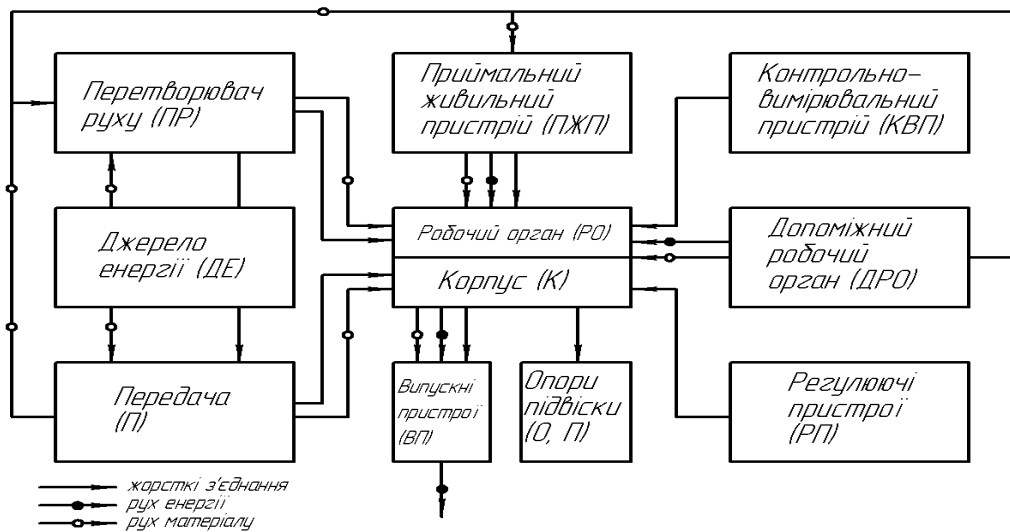


Рис. 3. Структурна схема машини, як логістична система.

Fig. 3. Structural diagram of the machine as a logistics system.

Усі підсистеми загальної структурної системи машини (див. рис.3) мають певне призначення. Джерело енергії (ДЕ) – це привід машини, що здійснює перетворення одного виду енергії в інший ( зазвичай електричної в механічну) і подавання її до робочого органу (РО). Привід складається з перетворювача енергії (ПЕ), передачі (П) і перетворювача руху (ПР). Найчастіше в ролі ПЕ використовують електродвигун, іноді електромагніти, гідروпневмоприводи. Передатні механізми можна поділити на три види: ті, що не змінюють швидкості, та ті, які змінюють і регулюють швидкість. До першого типу належать різноманітні муфти. Для зміни швидкості руху застосовують різні пристрої, а для регулювання – варіатори. ПР слугує для зміни виду руху, найчастіше обертальний рух перетворюється в інші види, наприклад, у зворотно-поступальний.

Корпус (К) – елемент, який слугує безпосередньо для кріплення і з'єднання елементів машини, може бути виконаний у вигляді корпусу литої сталі, металоконструкції або рами (зварної або розбірної).

Робочий орган (РО) – елемент машини, що безпосередньо впливає на продукт. РО, що виконують основну технологічну функцію, називають основними, а елементи які виконують додаткові операції, – допоміжним робочим органом (ДРО).

Приймально-живильний пристрій (ПЖП) – елемент машини, які слугують для приймання (подавання) сировини або напівфабрикатів і при необхідності бути керованою у часі підсистемою.

Випускні пристрої (ВП) – елементи машини, які слугують для виведення отриманого в результаті технологічної обробки одного або декількох продуктів.

Опори і підвіски (О і П) – елементи, які слугують для з'єднання рухомих елементів машин з нерухомими за допомогою пружин та інших пружних елементів. Багато сучасних машин і обладнання будівельної індустрії мають у своєму складі органи управління (У), регулювальні пристрої (РП), контрольно-вимірні прилади і апаратуру (КВП), сенсори (С). Отже, така машина за своєю будовою складається із взаємопов'язаних підсистем, характеризується керованістю руху елементів у часі, що і підставою її вважати логістичною системою.

#### 4.2.1. Схема та принцип роботи само адаптованої вібраційної машини.

Вібромайданчик з електромагнітним приводом являє собою двомасову автоколивальну систему[3]. Верхня маса включає масу робочого органу 3 (рис.4), на який встановлено форму 1 з сумішшю, що ущільнюється, та масу статора 4 електромагніта з котушкою 5. Верхня маса ізолювана від фундаменту опорними амортизаторами 2.

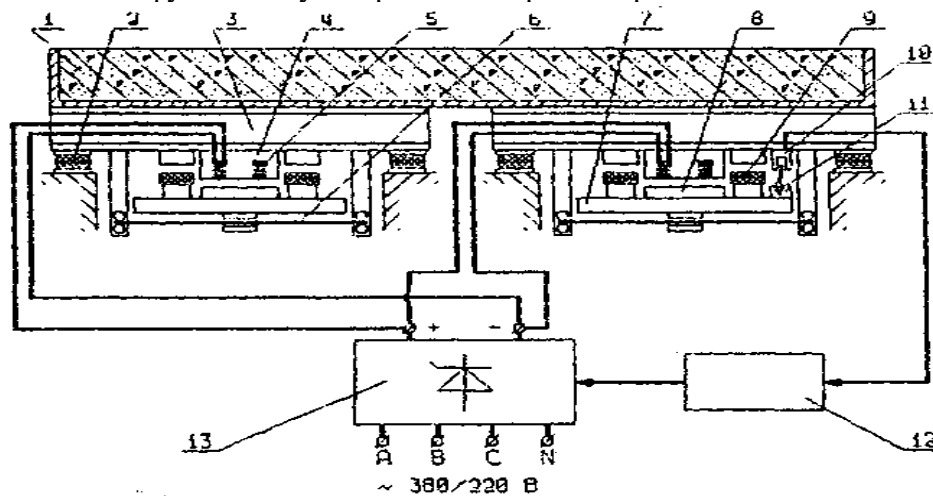


Рис.4. Само адаптований електромагнітний вібромайданчик з керованим режимом роботи.  
Fig. 4. Self-adapted electromagnetic vibrating platform with controlled operation mode.

Нижня маса включає масу ударника 7 з якорем 8 електромагніта. Ударник з'єднується з робочим органом пружним зв'язком (ресорою) 6. Маси співударяються через буфери 9, зазор в яких менший від зазору у магнітопроводі електромагніта. Котушки електромагнітів усіх віброблоків під'єднано паралельно до блока живлення. Між робочим органом і ударником встановлено переривник живлення електромагнітів. Переривник, який являє собою безконтактний індукційний датчик 10 і прапорець 11, є елементом зворотного зв'язку в схемі керування 12 блоком живлення 13. Блоком живлення є трифазний тиристорний випрямляч. Під час проходження струму в котушці під дією електромагнітної сили маси зближуються і стискають пружні елементи підвіски ударника. При заданому положенні мас (в початковий момент удару або трохи раніше) переривник знеструмує котушку. Далі, під дією сили тяги електромагніта, яка продовжується залишковим струмом, маси продовжують зближуватись, стискаючи буфери. Потім під дією потенціальної енергії стиснення буферів і підвіски ударника, а також завдяки відновленню швидкості після удару маси віддаляються. Через заданий проміжок часу (в початковий момент зближення мас або трохи пізніше) реле часу, яке ввімкнене до схеми керування, подає живлення на котушку і цикл повторюється. Зміною затримки часу на ввімкнення електромагнітів можна регулювати параметри системи. Це відбувається безпосередньо під час роботи машини за допомогою перемінного резистора, який увімкнено до реле часу. При регулюванні затримки часу в межах періоду коливальності частота ударів змінюється на 15%, напіврозмах коливальності робочого органу – на 30%, максимальне прискорення – на 200%, асиметрія – на 35%. При зміні затримки часу в широкіх межах отримано стійкі режими роботи установки в інтервалі 4...25 Гц. Це дає підставу рекомендувати використання таких систем, поряд із ущільненням, в інших технологічних операціях (наприклад сортуванні матеріалів, руйнуванні породи тощо).

**5. Обговорення результатів.** Здійснений наліз існуючих визначень «логістична система» та їх застосування засвідчив, що існує низка визначень понять такої системи. Слово-сполучення «логістична система», яка складається із двох термінів- логістична і система, розглянуто у контексті інженерії логістичних систем машин і процесів будівельної індустрії. Обумовлено це тим, що логістичні системи вкладаються у загальноприйняте поняття «сис-

теми», бо складаються із системо утворюючих елементів, тісно взаємопов'язаних і взаємозалежних між собою, які мають впорядковані зв'язки й утворюють певну структуру із задалегідь заданими властивостями. Наведена розробка принципів формування логістичних систем в основі яких покладені методи прогнозування, методологія системного аналізу, кібернетичний підхід, фізико-математичне моделювання. Сформульовані принципи формування синергетичної логістичної системи цілком корелюються із дисциплінами «моделювання та проектування логістичних систем» та «синтез логістичних систем». Наведені практичні рішення (рис.3, рис.4) цілком як за будовою так і за принципом роботи володіють загальноприйнятим властивостям логістичних систем, тобто являються адаптивними системами із зворотним зв'язком.

#### **6. Висновки:**

1. Приведені результати обґрунтування місця та визначення машин і процесів будівельної індустрії, об'єднаних у відповідності до спеціалізації інженерія логістичних систем спеціальності «прикладна механіка».

2. Розроблені принципи формування логістичних систем для схем і машин будівельної в основі покладені методи прогнозування, методологія системного аналізу, кібернетичний підхід, фізико-математичне моделювання, які можна передбачити як вибіркові дисципліни для бакалаврів та магістрів спеціалізації інженерія логістичних систем.

3. Наведені приклади логістичних систем будівельної індустрії як за будовою так і за принципом роботи володіють загальноприйнятим властивостям логістичних систем.

#### **Список використаних джерел:**

1. Назаренко І.І Синтез логістичних систем: конспект лекцій.– К.: КНУБА, 2016.– 128 с.
2. Назаренко І.І. Основи моделювання і проектування логістичних систем та процесів будіндустрії: монографія. Київ: «Видавництво Людмила», 2019. 190 с.
3. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем. Навчальний посібник (2-ге видання).- К.:Видавничий Дім «Слово», 2010. – 440с.
4. Василевський М. Системи забезпечення ланцюгів поставок у машинобудуванні : монографія / М.Василевський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 312 с.
5. Денисенко М. П. Організація та проектування логістичних систем: підручник / за ред. проф. М. П. Денисенка, проф. П. Р. Лековця, проф. Л. І. Михайлової. – К.: Центр учбової літератури, 2010. – 336 с.
6. Кислий В.М., Біловодська, О.А., Олефіренко О.М. та інші. Логістика: Теорія та практика: Навч. посіб.– К.: Центр учбової літератури, 2010. – 360с.
7. Крикавський Є.В., Чорнописька Н.В. Логістичні системи: [навч.посібник] /– Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. – 264 с.
8. Малуца Л.Я. Конспект лекцій з курсу «Логістика» : Електронний ресурс /– Тернопіль, ТНТУ, 2017. – 120с. – Режим доступу: <https://dl.tntu.edu.ua>
9. Метеленко Н.Г. Тарабан К. С.. Логістична система підприємства машино-будівної галузі у логістичному менеджменті. Финансы. Учет. Банки.. № 1 (20) 2014. С. 196 – 202.
10. Назаренко І.І. Гарнець В.М., Свідерський А.Т. та інші. Системний аналіз технічних об'єктів: Навчальний посібник.– К.: КНУБА, 2009.-164 с.
11. Назаренко І.І., Берник І.М. Основи проектування і конструювання машин та обладнання переробних виробництв: Навчальний посібник для вищих навчальних закладів.К.: « Видавничий Дім.: «Слово», 2012. – 590с.

#### **References:**

1. Nazarenko I.I. Synthesis of logistics systems: lecture notes.– Kyiv: KNUBA, 2016.– 128 p.
2. Nazarenko I.I. Fundamentals of modeling and design of logistics systems and processes of the building industry: monograph. Kyiv: Lyudmila Publishing House, 2019. 190 p.
3. Nazarenko I.I. Applied problems of the theory of vibration systems. Textbook (2nd edition).– Kyiv: Slovo Publishing House, 2010. – 440 p.

4. Vasylevsky M. Supply chain support systems in mechanical engineering: monograph / M. Vasylevsky. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2011. – 312 p.
5. Denysenko M. P. Organization and design of logistics systems: a textbook / edited by prof. M. P. Denysenko, prof. P. R. Lekovets, prof. L. I. Mykhaylova. – Kyiv: Center for Educational Literature, 2010. – 336 p.
6. Kyslyi V.M., Bilovodska, O.A., Olefirenko O.M. and others. Logistics: Theory and practice: Textbook – Kyiv: Center for Educational Literature, 2010. – 360 p.
7. Krykavskiy E.V., Chornopyska N.V. Logistics systems: [textbook] /– Lviv: Publishing house of the National University “Lviv Polytechnic”, 2009. – 264 p.
8. Malyuta L.Ya. Lecture notes for the course "Logistics": Electronic resource /– Ternopil, TNTU, 2017. – 120p. – Access mode: <https://dl.tntu.edu.ua>
9. Metelenko N.G. Taraban K. S.. Logistics system of an enterprise of the machine-building industry in logistics management. Finance. Accounting. Banks.. No. 1 (20) 2014. P. 196 – 202.
10. Nazarenko I.I. Garnets V.M., Svidersky A.T. and others. System analysis of technical objects: Textbook.– K.: KNUBA, 2009.-164 p.
11. Nazarenko I.I., Bernyk I.M. Fundamentals of design and construction of machines and equipment for processing industries: Textbook for higher educational institutions. K.: « Publishing House: «Slovo», 2012. – 590p.

УДК69.00.25

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0402>**Андрій Заприво́да**

кандидат технічних наук,  
завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9171-9325>  
E-mail: [zapryvoda.av@knuba.edu.ua](mailto:zapryvoda.av@knuba.edu.ua)

**МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВИХ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН  
ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ**

**АНОТАЦІЯ.** В роботі розроблено методи розрахунку основних параметрів поверхневих вібраторів, установок, вібраційних котків на основі дослідження змішаної дискретно-континуальної моделі системи «робочий орган машини- ущільнюоче середовище». Алгоритми розрахунку побудовані на попередньому визначенню вибору типу машини в залежності від виду технологічного процесу ущільнення, складу суміші, обґрунтування режимів та параметрів. Запропоновані числові значення критеріїв оцінки із забезпеченням ефективних та енергетичних масових, силових та енергетичних показників. Методики розрахунку передбачають як за резонансні та резонансні режими роботи вібраційних машин. Отримані результати відкривають шлях для проектування вібраційних машин і інших конструкцій даного класу.

**Ключові слова:** методи розрахунку, вібраційна система, резонанс, параметри, критерії амплітуда, частота коливань.

**METHODS FOR CALCULATING THE PARAMETERS OF SURFACE VIBRATING MACHINES FOR COMPACTING BUILDING MIXTURES**

**ABSTRACT.** The paper developed methods for calculating the main parameters of surface vibrators, installations, and vibratory rollers based on the study of a mixed discrete-continuous model of the system "machine working body - compacting medium". The calculation algorithms are based on a preliminary definition of the choice of the type of machine depending on the type of compaction process, the composition of the mixture, and the justification of modes and parameters. The numerical values of the evaluation criteria are proposed to ensure effective and energy mass, power, and energy indicators. The calculation methods provide for both resonant and resonant modes of operation of vibrating machines. The results obtained open the way for the design of vibrating machines and other structures of this class.

**Keywords:** calculation methods, vibration system, resonance, parameters, amplitude criteria, oscillation frequency.

**1. Вступ.** При розрахунках параметрів вібраційних машин варто вибрати розрахункову схему, яка відображає враховувати вплив бетонної суміші, що ущільнюється, на динаміку машини [1,2]. Ці закономірності вібраційного ущільнення бетонної суміші свідчать про те, що для розв'язання цієї задачі потрібно розглядати ущільнювальну машину і бетонну суміш як єдину динамічну систему. Саме такий підхід використаний в розробці методів розрахунку основних параметрів поверхневих вібраторів, установок, вібраційних котків на основі раніше виконаних досліджень [2-5].

**2. Аналіз публікацій по темі дослідження.** Розрахункам параметрів вібраційних машин присвячена низка робіт [1-4]. Аналізом з'ясовано, що існує два методи врахування бетонної суміші при визначенні параметрів: емпіричний та теоретичний. Емпіричний метод заснований на такому підході [6]. Вважається, що при завантаженні бетонною сумішшю форми, що розміщується на формувальній вібраційній машині для за резонансного режиму роботи, збільшення коливної маси зменшує амплітуду коливань робочого органу. Тому у фор-

мулах для її визначення коливань робочого органу враховується коефіцієнтом  $\alpha$  приєднання бетонної суміші, який являє собою відношення ту частину маси,  $m_{пр}$ , яка відображає ступінь впливу до повної маси суміші  $m$ :  $\alpha = m_{пр}/m$ . За такого підходу формула для визначення коливань робочого органу вібраційної машини  $X_0$  буде мати вигляд:

$$X_0 = \frac{m_0 r_0}{M_0 + \alpha m}, \quad (1)$$

де  $m_0 r_0$  - статичний момент маси дебалансів, який є складовою зовнішньої сили,  $F_0$ , яка визначається за залежністю:  $F_0 = m_0 r_0 \omega^2$ . Тут  $\omega$  - частота коливань вібромашини.

За різними експериментальними даними коефіцієнт приєднання бетонної суміші коливається в доволі широких межах,  $\alpha = 0,15 \dots 0,60$ . Коефіцієнт  $\alpha$  не враховує витрати енергії, які необхідні для ущільнення бетонної суміші. Тому, враховуючи вплив маси бетонної суміші на динаміку вібраційної машини, що працюють у за резонансному режимі, їх розрахункова схема розглядається у спрощеному вигляді як дисипативну систему (тобто з розсіюванням енергії) з одним ступенем вільності. При цьому дисипація енергії, пов'язана з ущільненням бетонної суміші, моделюється опором  $b$ , а кут  $\varphi$  зсуву фаз між зовнішньою силою і переміщенням при розрахунку потужності беруть таким, що дорівнює  $145 \dots 160^\circ$ . Середню потужність коливань вібраційної машини  $P_{cp}$  обчислюють формулою:

$$P_{cp} = \frac{1}{2} F_0 X_0 \omega \sin \varphi. \quad (2)$$

Очевидно, що формули (1) і (2) є занадто спрощеними і можуть бути використані тільки в рамках отриманих експериментальних значень коефіцієнта  $\alpha$  і кута  $\varphi$ .

Другий метод розглядає спільний рух машини і бетонної суміші на основі моделі, в якій елементи машини є дискретними, а бетонна суміш розподіленими параметрами. За такої моделі формула для визначення коливань робочого органу вібраційної машини  $X_0$  буде мати вигляд:

$$X_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(M\omega^2 + m\omega^2 a)^2 + (m\omega^2 d)^2}}, \quad (3)$$

де  $a$  і  $d$  - коефіцієнти, що враховують вплив пружно-інерційних та дисипативних властивостей бетонної суміші на рух вібраційної машини:

$$a = \frac{\alpha_n sh 2\alpha_n h + \beta_n \sin 2\beta_n h}{h(\alpha_n^2 + \beta_n^2)[ch 2\alpha_n h + \cos 2\beta_n h]}; \quad d = \frac{\alpha_n \sin 2\beta_n h - \beta_n sh 2\alpha_n h}{h(\alpha_n^2 + \beta_n^2)[ch 2\alpha_n h + \cos 2\beta_n h]}. \quad (4)$$

Залежності (4) враховують геометричні характеристики і реологічні властивості бетонної суміші та акустичні параметри, в тому числі і номер гармоніки частоти коливань, що є свідченням повноти врахування впливу бетонної суміші на коливання машини. Потужність приводу вібраційної машини на відміну від формули (2) окремо визначаються на ущільнення  $P_{ущ.}$  та на розсіяння енергії в вузлах машини  $P_{TP}$ :

$$P_{ущ.} = \frac{1}{2} F_0 X_0 \omega d; \quad P_{TP} = F_0 \mu \frac{d_y}{2} \omega. \quad (5)$$

де  $\mu = 0,005 \dots 0,008$  — коефіцієнт тертя в підшипниках;  $d_y$  — діаметр цапфи підшипника.

Аналіз залежності (3)...(5) засвідчує їх можливість застосування для широкого класу вібраційної техніки і тому саме цей підхід використаний в даних дослідженнях.

**3. Мета та задачі роботи.** Мета роботи полягає у розробці методів розрахунку основних параметрів поверхневих вібротрибок та вібраційних котків.

Задачі роботи:

- визначення раціональних параметрів поверхневих вібротрибок;
- розробка методів розрахунку їх основних параметрів поверхневих вібротрибок;
- визначення раціональних параметрів котків та розробка методів розрахунку їх основних параметрів.

**4. Визначення раціональних параметрів поверхневих вібротрибок та розробка методів розрахунку їх основних параметрів.**

**4.1. Визначення раціональних параметрів поверхневих вібротрибок.**

Поверхнєве ущільнення застосовують для всіх видів рухомих бетонних сумішей при укладанні їх завтовшки не більш як 200 мм. Особливо часто таке ущільнення використовують при спорудженні залізобетонних покриттів у дорожньому будівництві. Найпоширенішими вібраційними машинами поверхневого ущільнення є віброплити, віброрейки та вібраційні котки. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень віброплит та віброрейок визначені числові значення амплітуд безвідривних коливань  $X_0$  і меж їх граничних значень  $X_r$  (табл. 1). В таблиці 2 наведені числові значення раціональних частот коливань вібраційних плит і вібраційних рейок для основних характеристики будівельних сумішей.

Таблиця 1. Числові значення амплітуд безвідривних коливань  $X_0$  і меж їх граничних значень  $X_r$

Table 1. Numerical values of the amplitudes of continuous oscillations  $X_0$  and the limits of their limiting values  $X_r$

h, м	$X_0, м$	$X_r, м$
0,10	$6,24 \cdot 10^{-5} \dots 2,01 \cdot 10^{-4}$	$2,48 \cdot 10^{-5} \dots 1,02 \cdot 10^{-4}$
0,15	$6,86 \cdot 10^{-5} \dots 2,26 \cdot 10^{-4}$	$3,71 \cdot 10^{-5} \dots 1,53 \cdot 10^{-4}$
0,20	$7,48 \cdot 10^{-5} \dots 2,52 \cdot 10^{-4}$	$4,95 \cdot 10^{-5} \dots 2,04 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 2. Числові значення частот коливань віброплит і рейок

Table 2. Numerical values of vibration frequencies of vibrating plates and rails

Характеристики бетонної суміші	Частота коливань, $\omega$ 1/с			
	Дрібнозернисті заповнювачі суміші		Крупнозернисті заповнювачі суміші	
Жорсткість, Ж, сек	Ж<100	Ж>100	Ж<100	Ж>100
Висота шару, мм	400-500	500-600	-	-
h<50				
50 < h < 200	350-400	400-450	300- 350	350-400
h>200	300- 350	350-400	250- 300	300- 350

Робота всіх машин для ущільнення пов'язана з прикладенням на їхню поверхню циклічних навантажень. При навантаженні напружений стан суміші підвищується, а при розвантаженні знижується. У деяких випадках розвантаження не відразу відбувається за навантаженням, тобто максимальний напружений стан суміші підтримується протягом деякого часу.



Циклічне навантаження характеризується швидкістю зміни напруженого стану, яке визначається швидкістю зміни напруженого стану  $v_{uz}$  розуміється перша похідна від напруження  $d\sigma$  до часу  $dt$ :

$$v_{uz} = \frac{d\sigma}{dt} . \quad (6)$$

Якщо напруження в часі змінюється рівномірно, то швидкість зміни напруженого стану визначається як:

$$v_{uz} = \frac{\sigma}{t} . \quad (7)$$

В табл.3 представлені отримані значення параметрів циклічних навантажень, які мають місце при ущільненні ґрунтів різними засобами.

Таблиця 3. Параметри циклічних навантажень

Table 3. Parameters of cyclic loads

Спосіб ущільнення	Максимальний контактний тиск, $H/cm^2 \cdot 10^{-2}$	Швидкість зміни напруженого стану біля поверхні	Загальний час напруженого стану ґрунту за один цикл
Вібраційними плитами: – в гармонійному режимі коливань;	3,0-9,0	10-90	0,01-0,30
в режимі вібраційного трамбування	5,0-50,0	45-500	0,008-0,012

Ефективність вибраних та визначених параметрів із урахуванням залежності (6) оцінювалася за критерієм:

$$I_{в.пл.} = X_0 \omega^3 / h . \quad (8)$$

Поряд із віброплитами і віброрейками застосовується поверхнєве віброштампування, засноване на принципі одночасного впливу на будівельну суміш вібрації та навантаження (тиску) від штапу. Ефективність віброштампування із урахуванням залежності (6) оцінюється співвідношенням змушувальні сили вібратора  $F_0$  до величини статичної сили тиску на суміш  $F_{cm}$ :

$$I_{в.шт.} = F_0 / F_{cm} . \quad (9)$$

Оптимальне значення величини  $F_0 / F_{cm}$  знаходиться в межах 2–2,5. Абсолютна величина тиску при цьому складає 0,008–0,012 МПа. Найбільш ефективним для віброштампування є суміші підвищеної жорсткості (150–200 с). Для них величина питомого тиску знаходиться в межах 0,015–0,020 МПа, а відношення  $F_0 / F_{cm} = 2,5–3$ .

#### 4.2 Розробка алгоритму розрахунку параметрів поверхневих вібромашин.

Принцип роботи алгоритму розрахунку машин поверхневого ущільнення будівельних сумішей полягає в наступному. Вихідні параметри для розрахунку (блок 1) обираються в залежності від конкретного виду будівельної суміші, прийнятої схеми машини. На основі цього вибір фізичної моделі ущільнюючої бетонної суміші (блок 2) та здійснюється якісний аналіз і перевірка коректності моделі (блок 3), яка відображає реальний

процес законів зміни її реологічних властивостей. В залежності від умов та висоти ущільнюючого шару вибирається математична модель (дискретна чи дискретно-континуальна) (блок 4) і надалі паралельно здійснюється розрахунок параметрів і критерія (блок 5) та відбувається числове порівняння критеріїв ефективності технологічного процесу (блок 6). Якщо розраховані параметри є задовольняють даному критерію, параметри відповідають даному процесу (блок 7), як що ні (блок 8), програма переходить на блоки 2-4.

На рисунку 1 наведено алгоритм розрахунку поверхневих вібромашин.

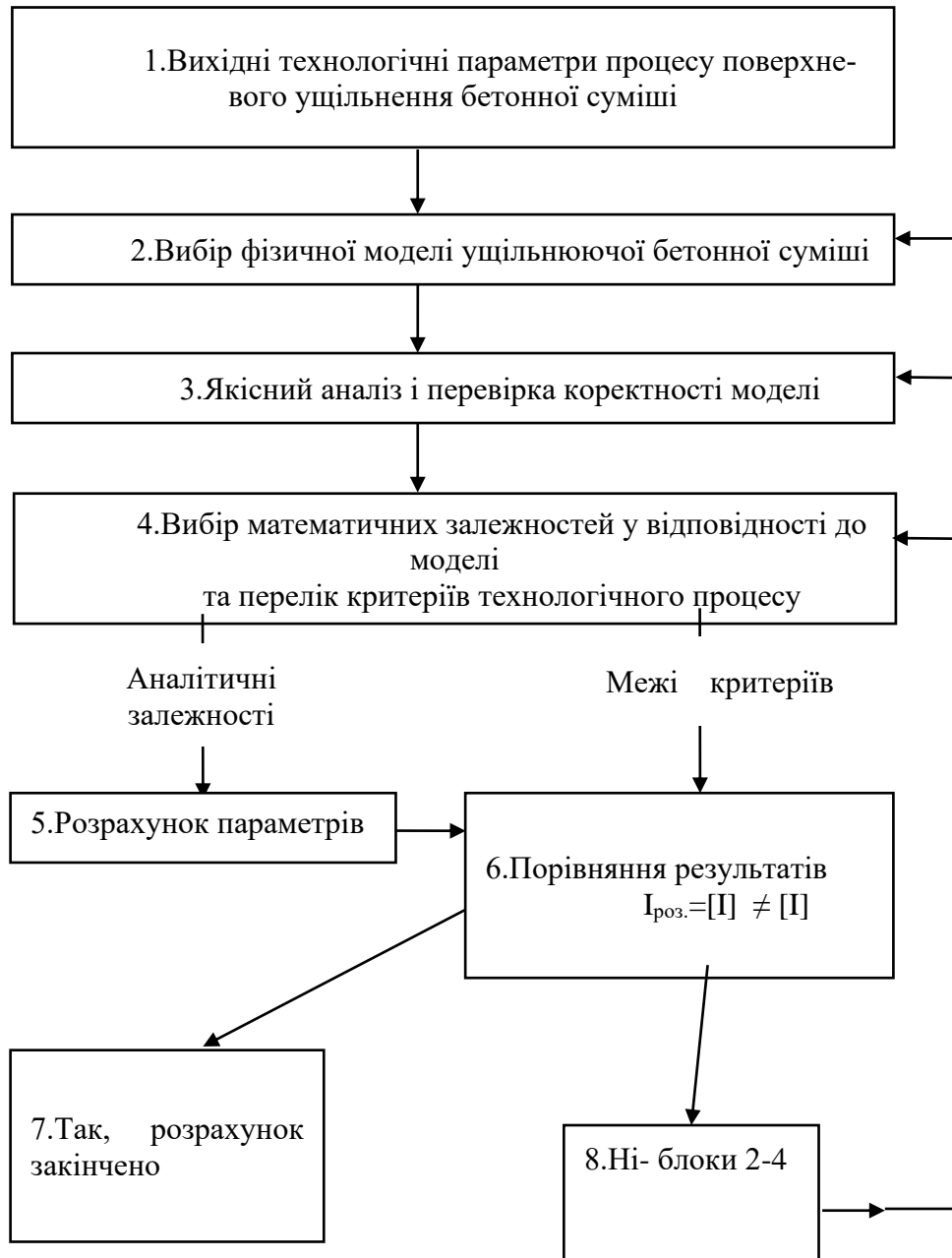


Рис. 1. Алгоритм розрахунку машин поверхневого ущільнення будівельних сумішей  
 Fig. 1. Algorithm for calculating machines for surface compaction of building mixtures

Для визначення амплітуди коливань за схемою (рис.1,а) використовуємо формулу:

$$x_0 = \frac{F_0}{c - m\omega^2}, \quad (10)$$

де  $m$ - маса вібратора;  $c$ - коефіцієнт пружності будівельної суміші;  $F_0$  – змушувальна сила вібратора;  $x$ -переміщення вібратора.

Коефіцієнт пружності будівельної суміші визначався на основі ізотермічного стискування повітря, тобто приймалася гіпотеза «повітряної» природи зв'язку між напруженням і деформацією:

$$c = \frac{S(\rho_{am} + \rho_{cm})^2}{l_0 \varepsilon \rho_0}, \quad (11)$$

де  $S$  – площа вібратора, що контактує із будівельною сумішшю;  $\rho_{am}$ ,  $\rho_{cm}$  - атмосферний і статичний тиск на суміш;  $l_0$ - глибина шару ущільнювальної будівельної суміші.

Розглядаються дві розрахункові схеми «поверхневий вібратор-ущільнююча будівельна суміш»(рис.2).

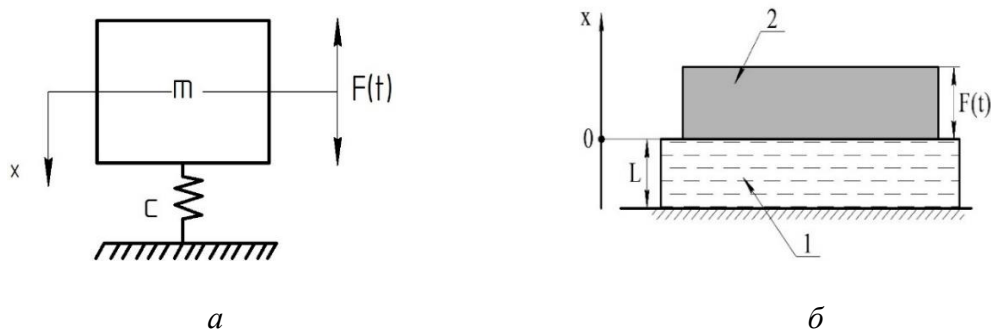


Рис.2. Розрахункові схеми «поверхневий вібратор-ущільнювальна будівельна суміш»:  
а- дискретна; б-дискретно-континуальна.

Fig. 2. Calculation schemes "surface vibrator-compacting construction mixture":  
a- discrete; b-discrete-continuous.

Для визначення амплітуди коливань за схемою (рис.2,б) використовуємо формулу(3). За схемою (рис.2,а) для вібропристроїв з направленими коливаннями, що працюють у резонансному режимі, потужність коливань  $P_{cp}$ , визначається за залежністю:

$$\max P_{cp} = \frac{1}{4} F_0 x_0 \omega, \quad (12)$$

де  $F_0$  — необхідна для підтримки заданої амплітуди змушуючи сила розрахована з урахуванням впливу бетонної суміші на вібропристрій;  $\omega$  – частота змушених коливань;

Для вібропристроїв із круговими коливаннями:

$$\max P_{cp} = \frac{1}{4} F_0 x_0 \omega. \quad (13)$$

Потужність сил тертя в підшипниках вібровозбуджувача:

$$P_{TP} = F_0 \mu \frac{d_y}{2} \omega, \quad (14)$$

де  $\mu = 0,005...0,008$  — коефіцієнт тертя в підшипниках;  $d_u$  — діаметр цапфи підшипника.

Загальна потужність двигуна, кВт:

$$P_d = \frac{\max P_{CP} + P_{TP}}{1000\eta}, \quad (15)$$

Потужність вібраційних плит та вібраційних рейок за розрахунковою схемою (рис.1,б) визначається по формулі(4).

Продуктивність визначається для конкретного матеріалу з урахуванням товщини шару, що ущільнюється:

$$П = b_y \cdot h_y \cdot l_y \cdot \frac{60}{t_u}, \quad (16)$$

де  $П$  - продуктивність, т/год або м<sup>3</sup>/год;  $b_y$  - ширина шару, що ущільнюється, м;  $h_y$  - товщина шару, що ущільнюється, м;  $l_y$  - довжина ущільнювальної ділянки 10-20 м;  $t_u$  - тривалість циклу ущільнення, що включає час одного подвійного проходу на перших (низька швидкість) та наступних (висока швидкість) проходах, помножене на кількість проходів по ширині та кількість проходів по одному місцю, хв.

#### 4.3. Визначення раціональних параметрів котків та розробка методів розрахунку їх основних параметрів.

Розрахункова схема вібраційного котка приведена на рисунку 3. Вібраційний коток (рис.3,а) моделюється масами  $m_1$   $m_2$ , (рис.3,б), які рухаються під дією змінної змушуючої сили,  $F$  в ідеальних (без тертя) напрямних, і отже, у будь-який момент часу її положення може визначатися координатами.  $x_1$  і  $x_2$  [ 7]. Всі пружні властивості моделюються лінійними пружинами із коефіцієнтами пружності  $c_1$  та  $c_2$ . Опір коливанням моделюється демпфером, що характеризує в'язкий характер.

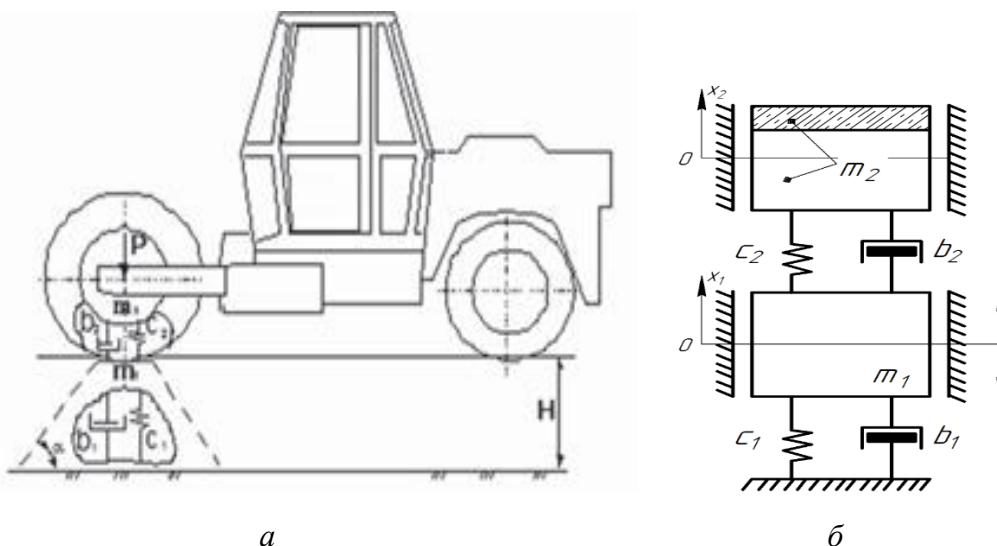


Рис. 3. Вібраційна система «віброкоток-ущільнюючий матеріал»:

а – загальна схема; б – розрахункова схема

Fig. 3. Vibration system "vibrating roller-compacting material":

a - general scheme; b - calculation scheme

В табл.4 представлені отримані значення параметрів циклічних навантажень, які мають місце при ущільненні ґрунтів різними котками.

Наведені дані відповідають кінцю процесу, коли щільність ущільнюючого матеріалу близька до  $0,95\delta_{\text{шах}}$ . З таблиці видно, що процес ущільнення характеризується великою швидкістю процесу й високими контактними тисками. Висока частота ударів вібраційних машин підвищує ефективність їхньої дії. Таким чином, в результаті впливу зовнішнього навантаження деформація ущільнюючого матеріалу значно залежить від параметрів навантаження, при цьому параметри міняються в досить широких межах.

Таблиця 4. Параметри циклічних навантажень котками

Table 4. Parameters of cyclic loading by rollers

Спосіб ущільнення	Максимальний контактний тиск, $H/cm^2 \cdot 10^2$	Швидкість зміни напруженого стану біля поверхні	Загальний час напруженого стану ґрунту за один цикл
Котками: з гладкими вальцями на пневматичних шинах	70-120	25-300	0,04-0,25
	60-100	5-60	0,10-0,40
Вібраційними котками	40-120	50-800	0,01-0,015

Перехід від вібраційного до ударного режиму коливань відбувається при  $F_0 = 2F_{\text{ст}}$  ( $F_0$  - змушуюча сила,  $F_{\text{ст}}$  - вага вальця). Тут розмах коливань вальця котка збільшується прямо пропорційно відносній величині вимушених коливань. Така закономірність має місце до  $F_0 = 8F_{\text{ст}}$ , після чого вона набуває експонентний характер. Ущільнення незв'язних ґрунтів більш ефективно в тому випадку, коли коток робить квазігармонійні коливання великої амплітуди. При такому режимі на ущільнення одиниці об'єму ґрунту витрачається мінімальна робота. Цей режим при частотах 30-60 Гц досягається за умови  $F_0 \ll 2F_{\text{ст}}$ . Разом з тим, ущільнення зв'язкових ґрунтів повинно проводитися при ударних коливаннях котка, і тому при виборі відносної величини вимушених коливань можливо керуватися нерівністю  $F_0 (3,5-4,0) F_{\text{ст}}$ . Одержуваний від застосування віброкотків ефект можна оцінити коефіцієнтом ефективності, який представляє собою відношення:

$$K_{\text{эф}} = q_{\text{ст}} / q_{\text{дин}} \quad (17)$$

де  $q_{\text{ст}}$  - лінійний тиск котка статичної дії,  $q_{\text{дин}}$  - лінійний тиск котка динамічної дії.

Максимальні значення контактних напружень в ущільнюючому середовищі для віброкотків виражаються залежністю:

$$\sigma_{\text{max}} = 0,5 \sqrt{\frac{q_{\text{в}} E}{R}} \quad (18)$$

де  $R$  - радіус вальця;  $E$  - модуль деформації в ущільнюючому середовищі;  $q_{\text{в}}$  - лінійний тиск, який визначається за формулою

$$q_{\text{в}} = K_{\text{пр}} \frac{F_0 + F_{\text{ст}}}{L} \quad (19)$$

де  $F_0$  - амплітудне значення гармонійної сили вальця;  $F_{ст}$  - сила тяжіння вальця;  $L$  - ширина вальця;  $K_{пер}$  - коефіцієнт перевищення,  $K_{пер} = 3 - 5$  (рис.4)

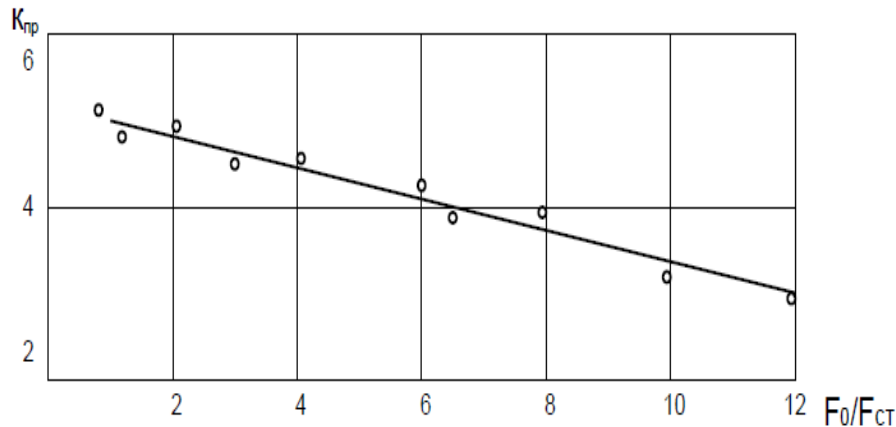


Рис.4.Залежність коефіцієнта перевищення  $K_{пер}$  контактного тиску від співвідношення амплітудного значення гармонійної сили вальця до сили тяжіння вальця

Fig. 4. Dependence of the coefficient of excess  $K_{per}$  of contact pressure on the ratio of the amplitude value of the harmonic force of the roller to the force of gravity of the roller

## 5. Висновки:

1. Встановлені раціональні параметри поверхневих вібр машин та розроблено алгоритм розрахунку їх основних параметрів.

2.Виявлено раціональні параметри котків та розроблена методика розрахунку їх основних параметрів.

3.Визначення режимів та параметрів поверхневих вібропристроїв здійснювалося із урахуванням, що розрахункова модель суміші достеменно відображає реальні умови її руху із урахуванням: всіх складових опор, до яких відносяться інерційні, пружні і дисипативні її властивості; характер коливань з урахуванням сил, які діють в контактній зоні; вираховування впливу конструктивної схеми машини на режими формування поверхні виробу.

## Список використаних джерел:

- 1.Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем (2-е видання). К.:Видавничий дім «Слово», 2010. – 440с.
- 2.Ivan Nazarenko, Viktor Gaidaichuk, Oleg Dedov, Oleksandr Diachenko. Investigation of vibration machine movement with a multimode oscillation spectrum. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol 6, No 1 (90). P. 28–36.
- 3.Запривода А.В. ,Ручинський М.М Стабілізація і синхронізація режиму роботи вібропристрою для формування великих горизонтальних поверхонь /– К.: КНУБА: «Техніка будівництва», №34, 2015. – С. 57-61.
- 4.Запривода А.В. Ручинський М.М Дослідження режимів руху вібропристрою в умовах взаємодії із оброблювальним середовищем / Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», м. Одеса, 2016. С.258.
- 5.Запривода А.В. Параметри і режими роботи вібропристрою для формування горизонтальних поверхонь / Запривода А.В. К.: КНУБА: «Гірничі, будівельні, дорожні, меліоративні машини», № 5 , 2016. С.48-53.
- 6.Nesterenko M.P.and others. Vibration platform for forming large-sized reinforcedconcrete products // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019, No 5. – P. 284 – 288.

7. Андрій Заприво́да. Ефективність процесу ущільнення будівельних сумішей для улаштування до-ріг. Тези V Міжнародної науково практичної конференції «Енергоощадні машини і технології», КНУБА ,2024.

### References:

1. Nazarenko I.I. (2010) Applied problems of the theory of vibration systems (2nd edition). K.: Publishing house "Slovo", p. 440.
2. Ivan Nazarenko, Viktor Gaidaichuk, Oleg Dedov, Oleksandr Diachenko. (2017) Investigation of vibration machine movement with a multimode oscillation spectrum. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. Vol 6, No 1 (90). P. 28–36.
3. Zaprivoda A.V., Ruchinsky M.M. (2015) Stabilization and synchronization of the operating mode of a vibrating device for forming large horizontal surfaces /– K.: KNUBA: “Construction Technology”, No. 34, P. 57-61.
4. Zaprivoda A.V. Ruchinsky M.M. (2016) Research of the modes of motion of a vibrating device in conditions of interaction with the processing environment / Materials of the XVII international scientific and practical conference "Progressive equipment, technology and engineering education", Odessa. P.258.
5. Zaprivoda A.V. (2016) Parameters and operating modes of a vibrating device for forming horizontal surfaces / Zaprivoda A.V. K.: KNUBA: "Mining, construction, road, and land reclamation machines", No. 5, P.48-53.
6. Nesterenko M.P. and others. (2019) Vibration platform for forming large-sized reinforced concrete products // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, No 5. – P. 284 – 288.
7. Andriy Zaprivoda. (2024) Efficiency of the compaction process of building mixtures for road construction. Abstracts of the V International Scientific and Practical Conference "Energy-saving Machines and Technologies", KNUBA, 2024.

UDC 621.926.2

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0403>**Yevhen Mishchuk,**

Doctor of Philosophy in Engineering Sciences,

Associate Professor of the

Department of Machines and Equipment for Technological Processes,

Kyiv National University of Construction and Architecture,

31 Air Force Ave., Kyiv, 03037, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7850-0975>E-mail: [mischuk.ieo@knuba.edu.ua](mailto:mischuk.ieo@knuba.edu.ua)

## STRUCTURAL REVIEW AND ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL AND DESIGN PARAMETERS OF CRUSHING EQUIPMENT FOR THE CONSTRUCTION INDUSTRY

**ABSTRACT.** *Due to the growth in the volume of mineral extraction and the increasing demand for the processing of construction waste, reducing energy consumption has become one of the key areas of research in the field of machines for the production of building materials. Solving the problem of determining energy consumption is a difficult task, since these costs depend on numerous variable factors that vary during the operation of the machine and are difficult to accurately predict. The development and creation of energy-efficient crushing machines is one of the areas of improving the technologies for the production of building materials. The work considers the designs of common crushing machines for the production of building materials and their features. A criterion-based assessment was performed on the main generalized parameters of the mechanical mode, on the basis of which the most promising models were established and recommendations were given regarding the area of further research.*

**Keywords:** *crusher, energy efficiency, criterial assessment, mechanical mode parameters.*

**1. Introduction.** The process of disintegration (division into particles) of a material is understood as a series of operations as a result of which the size of a solid particle of material (rock) is reduced from the initial to the final sizes required for the industry. For example, for the construction industry, the size of the raw material can reach 1.2 meters in diameter, while the size of the finished product can reach several microns in diameter. The process of disintegration in the construction materials industry can be divided into two separate processes: crushing and grinding [1],[2].

It has been established that a significant amount of energy is spent on crushing and grinding various materials. These costs continue to grow due to the increase in the volume of mineral extraction and the growing need for processing construction waste. In addition to energy costs, the operating costs of enterprises engaged in the production of construction materials are significant [3], [4].

Thus, the problem of reducing the cost of manufactured products is relevant today. Optimization of energy consumption of the crushing process is a rather difficult task, as it is associated with a significant number of factors. In general, all factors that affect the energy consumption of the crushing process can be divided into two categories: 1) physical properties of the working environment; 2) technological and design features of crushing equipment [5].

Common crushing equipment used in most enterprises for the production and processing of building materials are jaw, cone, roller, rotary and hammer crushers [6],[7].

**2. Literature Review and Problem Formulation.** In [8], methods for analyzing the failure of jaw crusher structural elements using statistical methods are considered, but the paper does not specify which jaw crusher model is used for the analysis, which could give an idea of the physical characteristics of the materials from which the crusher elements are made. In addition, it is not clear whether these methods can be used for other crushing machines and, if so, what parameters need to be generalized. In [9], a good energy analysis of the basic laws of material destruction by the working bodies of crushing machines is given, but the work poorly highlights the design features of crushing machines and, in general, the emphasis is on the physical characteristics of the working environment and the parameters of the mechanical mode, but the dependence of these parameters



on the design features of crushing machines is not noted. In [10], the crushing process by a jaw crusher is compared from the point of view of energy consumption when using a single-stage and two-stage scheme. In this case, an experimental jaw crusher is used in the paper, i.e., to use the results of the work, it will be necessary to use similarity coefficients. On the other hand, these results can only be used for jaw crushers with simple jaw movement.

**3. Research Objectives.** To analyze modern designs of crushing equipment and determine the main directions of their improvement. Based on the analysis, to establish a set of parameters of the mechanical mode of crushers that have the greatest impact on energy consumption. To assess the impact of crusher design elements on the consumption of supplied energy.

**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 criterion-based evaluation of parameters based on the construction of histograms of the corresponding criteria. Microsoft Excel software is used to perform calculations and construct histograms.

**5. Discussion of the results.** Jaw crushers are divided into the following types by the nature of their operation, which depends on the shape of the crushing parts and their movement: 1) jaw crushers with a simple jaw movement (double toggle jaw crusher); 2) jaw crushers with a complex jaw movement (single toggle jaw crusher). A separate subgroup should be allocated to the vibrating jaw crusher. This classification, in addition to the vibrating jaw crusher, is classical. However, today there is a trend towards the creation of compact, modular and mobile equipment. Because of this, the jaw crusher with a complex jaw movement has become more widespread [11].

Jaw crushers are mainly used for coarse and medium crushing. Since the shape of the crushing chamber of jaw crushers is wedge-shaped, when the material to be crushed enters it, it is destroyed due to the convergence of the crushing cheeks. The main method of destruction in jaw crushers is destruction by crushing, however, due to the kinematic features of the movement of the cheek and the geometry of the crushing surface in the crushing chamber, it was possible to combine other methods of destruction. Such methods are destruction by abrasion and splitting or bending. The combination of abrasion and splitting was implemented in crushers with complex movement of the cheek [12], [13].

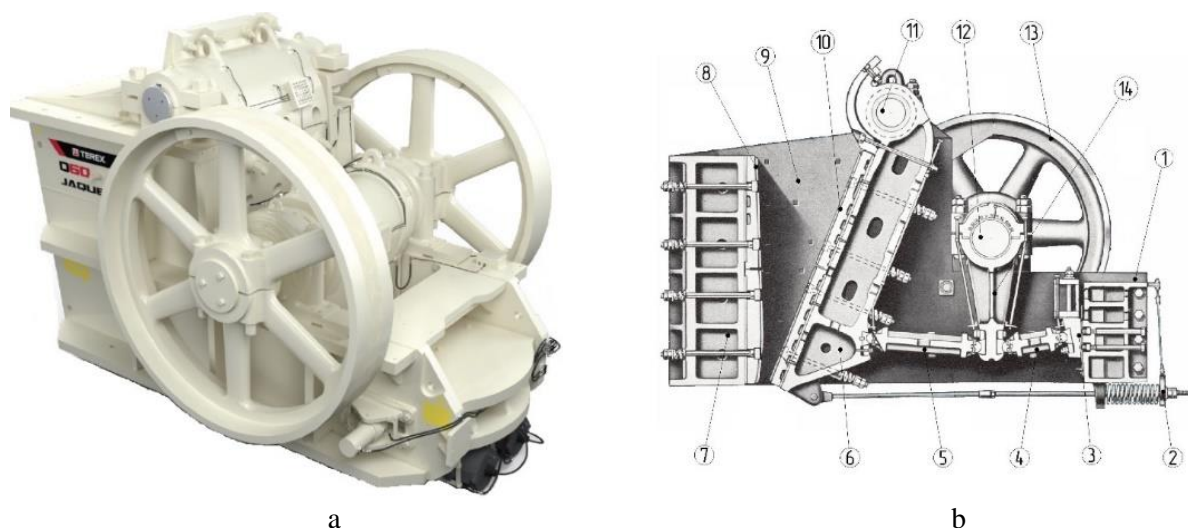


Fig. 1. Jaw crusher with simple jaw movement:

a – jaw crusher with simple jaw movement of the Terex D60 Jaques company;

b – jaw crusher with simple jaw movement in section: 1 – housing; 2 – rod; 3 – adjustment mechanism; 4, 5 – spacer plate; 6 – movable jaw; 7 – fixed jaw; 8, 10 – replaceable crushing plate; 9 – crushing chamber; 11 – axis; 12 – eccentric shaft; 13 – flywheel; 14 – connecting rod

A jaw crusher with a simple jaw movement is shown in Fig. 1. The structure of a jaw crusher with a simple jaw movement is shown in Fig. 1, b. The crusher consists of a housing 1 in which an

eccentric shaft 12 is mounted on bearings with a connecting rod 14 suspended from it. The lower end of the connecting rod has special sockets in which the spacer plates 4 and 5 are freely installed. The spacer plate 5 rests with its other side against the socket of the movable jaw 6. The other end of the spacer plate 4 rests against the adjusting mechanism - a wedge stop. The rod 2 provides the reverse movement of the movable jaw and ensures reliable fixation of the spacer plates. The movable jaw is suspended on an axis 11, which is installed in the crusher housing. The grinding plates 8 and 10 are fixed to the stationary 7 and movable 6 jaws, respectively [14]. The working surfaces of the crushing plates and the side walls of the crusher body form a crushing chamber 9. On one side, a belt pulley is installed on the cantilever part of the eccentric shaft, through which the crusher is driven by the electric motor. On the other side, a flywheel is installed on the cantilever part of the eccentric shaft.

The main functions of the flywheel are to ensure smooth running during the work process and alternate energy storage and transmission. Fig. 1, a shows a model of a jaw crusher with a simple jaw movement D60, manufactured by Terex.

A jaw crusher with a complex jaw movement is shown in Fig. 2.

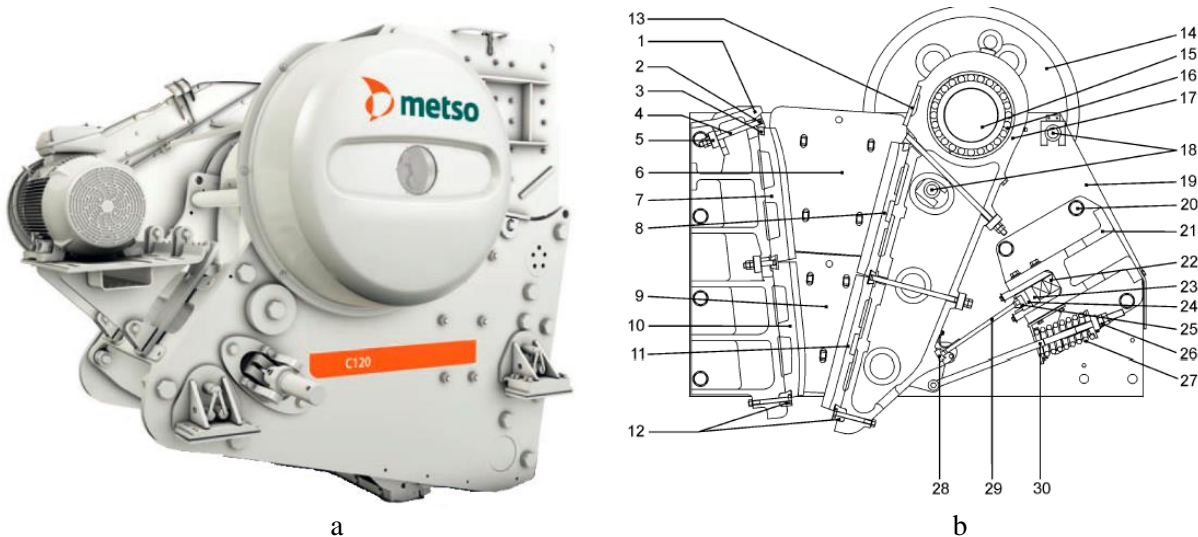


Fig. 2. Jaw crusher with complex jaw movement:

a – jaw crusher with complex jaw movement C120 of Metso; b – jaw crusher with complex jaw movement in section: 1 – front section of the frame; 2 – upper wedge; 3 – filling wedge; 4 – jaw plate bolt; 6 - disc spring assembly; 6 – side lining plate of the crushing chamber, upper; 7 – stationary jaw plate, upper; 8 - movable jaw plate, upper; 9 - side lining plate of the crushing chamber, lower; 10 - stationary jaw plate, lower; 11 - movable jaw plate, lower; 12 – fixed wedge; 13 - movable jaw eyelet protection plate; 14 – flywheel; 15 – eccentric shaft; 16 – movable cheek bearing; 17 – movable cheek; 18 – frame fastening rods; 19 – side plate; 20 – frame bolt; 21 – rear frame section; 22 – adjusting wedges; 23 – insert; 24 – plate of support liners of the spacer plate; 25 – spacer plate liner; 26 – locknuts with thrust bearing; 27 – cheek withdrawal (tension) spring; 28 – spacer plate; 29 – spacer plate; 30 – cheek withdrawal rod.

The structure of a jaw crusher with a complex jaw movement is similar to that of a crusher with a simple jaw movement. The difference is that the crusher with a complex jaw movement does not have a connecting rod, and the movable jaw 17 is fixed directly to the eccentric part of the drive shaft 15. In the lower part, the jaw is connected by a spacer plate 29 to the machine hub through a wedge adjustment mechanism 22. The crusher also has a jaw withdrawal rod 30 [15]. In such a crusher, the trajectory of the swing of the movable jaw is a closed elliptical curve, with a minimum difference between the axes of the ellipse in the upper part of the jaw and a maximum in the lower part. Changing the nature of the swing of the movable jaw changes the load pattern on the material, which is destroyed under the action of compressive and shear loads.

In modern models of jaw crushers, automated work process control systems are widely implemented. One of such systems is automatic adjustment of the outlet opening due to the hydraulic

system of driving the adjusting wedges or directly using hydraulic cylinders. The main components of the mechanical system of adjusting the outlet opening (Fig. 3) are adjusting wedges 1, nuts 2 and stop tubes 3. To change the outlet opening of the crusher, it is necessary to turn the stop nuts 3 using a separate ratchet mechanism.

On Fig. 3, b shows the hydraulic system for moving the spacer plate of a jaw crusher. In crushers with such a system, the outlet opening is changed by moving the wedge stops 2, hydraulic cylinders 1 and 5. In turn, the wedge stops move the spacer plate 4. The position of the plate is fixed in the housing 6 by means of plates 3.

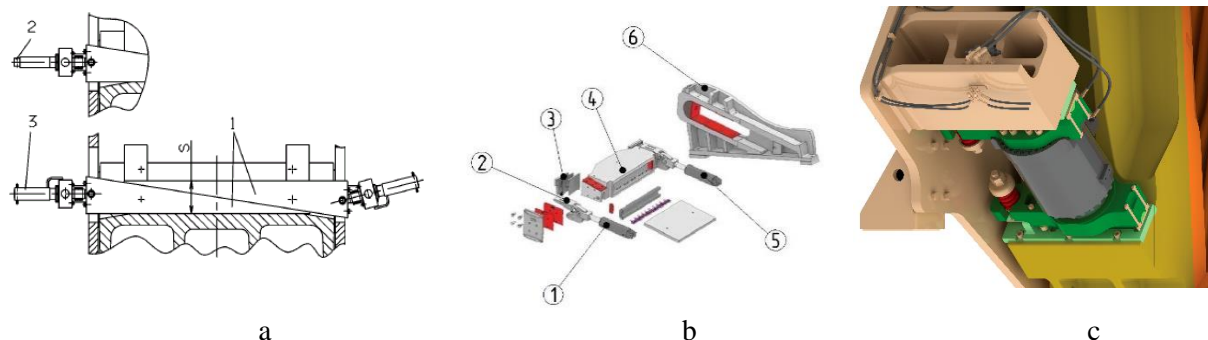


Fig. 3. Adjusting devices of the jaw:

a – adjustment of the outlet opening by turning the nut with a ratchet mechanism; b – adjustment of the outlet opening by moving the spacer plate with hydraulic cylinders; c – adjustment of the outlet opening by moving the hydraulic cylinder rod

Fig. 3, c shows the outlet adjustment unit of a jaw crusher. In such crushers, the spacer plate and the adjustment device are replaced by a hydraulic cylinder.

The main parameters of the mechanical mode of jaw crushers are: 1) the angle of engagement; 2) the stroke of the movable jaw; 3) the frequency of the drive shaft; 4) productivity; 5) power.

The most famous manufacturers of jaw crushers are the following companies: Metso, Sandvik, Telsmith, Terex, Lipmann- Milwaukee, Thyssenkrupp, Eagle, Parker, Meka, FTM, Trio, Hewitt Robins, etc. It is also worth mentioning such manufacturers as Komatsu, Finlay, McCluskey, Rubble Master, Tesab, however, they are more inclined to manufacture mobile crushing plants, which include jaw crushers.

When considering the parameters of the mechanical mode, the following main criteria of influence for jaw crushers were determined: 1) productivity per mass; 2) productivity per power; 3) mass per power; 4) power per crushing degree; 5) frequency of jaw oscillations per productivity. Corresponding histograms were constructed for each criterion, Fig. 4.

Analyzing the impact criteria, the following conclusions were formed: 1) the best results in most parameters are achieved by jaw crushers manufactured by Sandvik, Metso, Lipmann; 2) the best results in terms of the impact of power on the degree of crushing are achieved by a vibrating jaw crusher; 3) medium-crushing jaw crushers completely dominate the market compared to jaw crushers with simple jaw movement, provided that the inlet size is up to 1200x1500. This is also reflected in the criterion assessment.

**Cone crushers.** In cone crushers, the material is destroyed under the action of compressive, abrasive and bending loads between the outer and inner cones. Depending on the design of the crushing machine and its purpose, the inner cone can perform the following types of motion: 1) moving along a circular trajectory, while performing translational motion, Fig. 1.7, a (Telsmith type crushers); 2) oscillating relative to a fixed point, which is called the gyration point, Fig. 1.7, b (gyration crushers and Symons type crushers) [16].

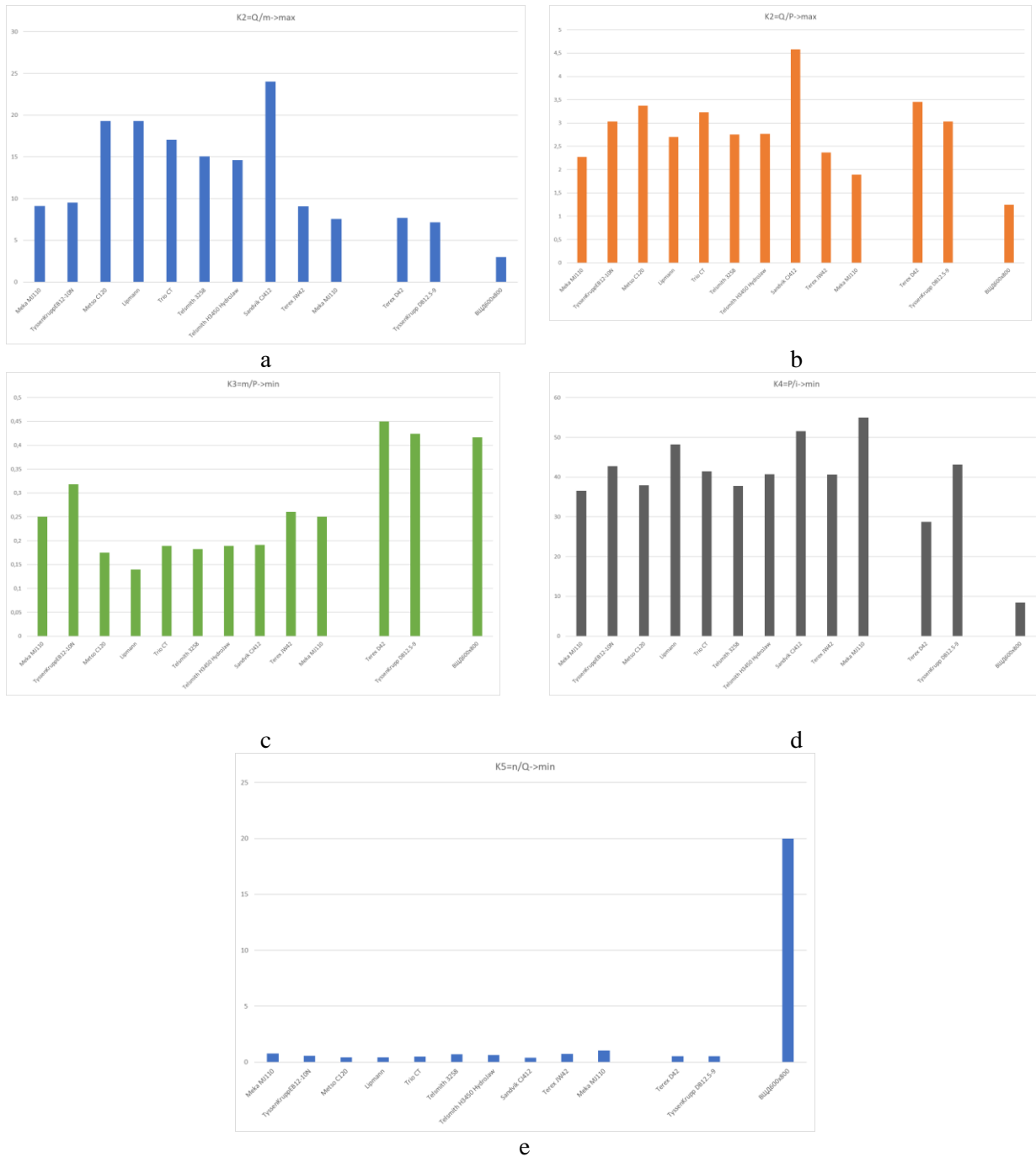


Fig. 4. Histograms of influence coefficients for jaw crushers:

a - productivity per mass; b - productivity per power;  
c - mass per power; d - power per crushing degree; e - jaw oscillation frequency per productivity

Crushing in a cone crusher occurs continuously with the sequential movement of the crushing zone in a circle. That is, while one side of the moving cone approaches the fixed cone during rotation, the other side moves away from the fixed cone and the material falls through the annular gap under the action of its own weight.

By design, cones of cone crushers can be steep cones, which are used for crushing large materials, and flat cones, which are used for crushing medium and fine materials. By technological purpose, cone crushers can be classified into:

- cone crushers for coarse crushing (Gyratory Cone Crusher), in which the maximum size of the feed material varies within 400 - 1260 mm, the width of the outlet (Closed Side Setting) is within 75 - 343 mm;

- cone crushers for medium and fine crushing (KSD). The size of the input material varies from 40 mm to 414 mm. The width of the outlet varies within 6 mm -50 mm.

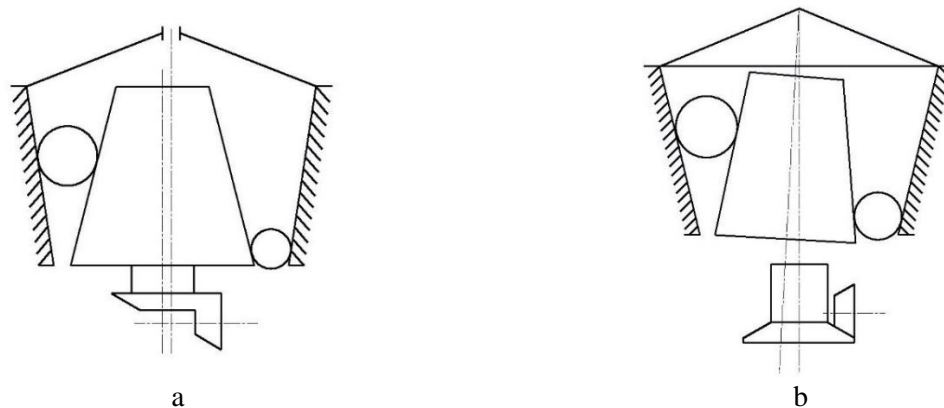


Fig. 1.7. Schemes of cone crushers:

a – movement of a moving cone along a circular trajectory; b – oscillation of a moving cone relative to a fixed point.

A separate category should be allocated to vibrating cone crushers. In general, vibrating cone crushers can be divided into the following types: 1) with a vibrator on the cone; 2) with a vibrator on the housing; 3) with a vibrator on the housing and cone. It should be noted here that a cone crusher with a vibrator on the cone has practical application [17], [18].

The main types of medium and fine cone crushers are Symons and Telsmith crushers.

The structure of the cone crusher for coarse crushing (gyration) is shown in Fig. 5. The crusher consists of the lower 2, middle 4 and upper 6 parts of the frame. The upper part of the frame is simultaneously a traverse in which the shaft suspension unit 7 is located. The inner surface of the fixed cone 12 and the inner surface of the traverse are lined with replaceable plates 13 and 10. In addition, lined plates 11 and 14 are installed on the outer surface of the traverse and in the lower part of the frame. A movable cone 3 is rigidly fixed on the conical shaft 7, also lined with replaceable plates 5. The eccentric sleeve 1 is installed in a hollow eccentric shaft 20, which is driven by the belt pulley 15, through the drive shaft 16 and the bevel gear 17.

The eccentric hollow shaft 20 itself is installed in the cylindrical cup of the frame 19. The eccentric hollow shaft 20 has an eccentric bore, due to which the lower end of the shaft, when rotating, outlines a conical surface with the apex at the suspension point. A bushing 18 is installed between the cylindrical cup 19 and the eccentric hollow shaft 20. The cone suspension assembly consists of a protective bushing of the main shaft 8 and a bearing 9. When the crusher is operating, the suspension parts and friction pairs withstand high loads. These loads can be reduced by using hydraulic thrust bearings, which in turn are also used to automatically adjust the outlet gap. When starting such crushers in the “under the blockage” mode, an additional engine or a hydraulic unloading system of the crushing chamber can be used. In general, the design of a large-sized cone crusher has remained almost unchanged for more than half a century.

A feature of cone crushers for coarse crushing is that rocks in the crushing chamber are subjected to a complex load from compression and bending. The resistance of rocks to bending is less than the resistance to compression, which gives cone crushers an advantage over jaw crushers in terms of energy consumption for the crushing process. The finished product itself after passing through the crushing chamber of the cone crusher has a more rounded shape, i.e. the percentage of flaky grains is small. The disadvantage is that due to the peculiarities of the cone crusher, namely the rolling of the inner cone over the outer one, these crushers do not work well with viscous material, which can lead to clogging of the crushing chamber. In addition, when crushing viscous materials, energy consumption increases significantly.

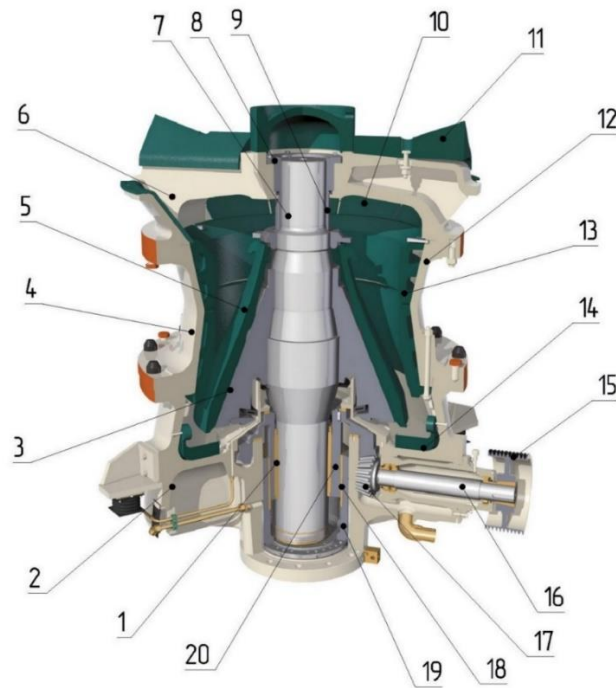


Fig. 5. Structure of a cone crusher for coarse crushing:

1 – eccentric bushing; 2 – lower part of the frame; 3 – movable cone; 4 – middle part of the frame; 5 – lined plate of the movable cone; 6 – upper part of the frame; 7 – shaft; 8 – bushing of the cone shaft suspension unit; 9 – bearing; 10 – inner lining of the traverse; 11 – outer lining of the traverse; 12 – fixed cone; 13 – lining of the fixed cone; 14 – inner lining of the lower part of the frame; 15 – pulley; 16 – drive shaft; 17 – bevel gear; 18 – bushing of the supporting unit of the movable cone; 19 – cylindrical cup; 20 – eccentric hollow shaft

Medium and fine cone crushers have a different structure compared to the coarse cone crusher. The main significant differences are the profile of the crushing chamber, the cantilever shaft, the hydraulic unloading scheme and the support of the moving cone. In medium and fine cone crushers, the moving cone is more widened at the base (the angle at the base varies within 40-42 degrees, while in coarse crushers the angle at the base is 70-80 degrees), this contributes to obtaining a more uniform size of the crushed product. Such crushers are used in the second and subsequent stages of crushing.

The structure of a medium crushing cone crusher is shown in Fig. 6, a.

The crusher consists of a frame 1, a hydraulic system 2, which is designed for quick unloading of the crushing chamber when the crusher is operating “under a blockage” or when an uncrushed object hits it. The principle of operation of the system is to move the rods of the hydraulic cylinders 10, which leads to an increase in the distance between the movable and fixed cones. The hydraulic cylinders 10 themselves are also designed to damp vibrations of the fixed cone of the crusher assembly. The hydraulic drive 3 is designed to change the outlet opening of the crusher (CSS) by rotating the drive flange 5, which is rigidly fixed to the fixed cone, the threaded ring 4 performs the function of locking the threaded ring 2 and the fixed cone 6. Accordingly, the fixed 6 and the movable cones 15 have replaceable lined plates 7 and 16. The loading funnel 8 allows you to maintain a constant loading mode with material. The flange 9 performs the function of locking the movable cone 15 on the shaft 14 from moving the cone along the axis, and also evenly distributes the material along the annular loading hole. The crusher is driven by an electric motor through the pulley 11 of the belt transmission, then through the drive shaft 12 and the bevel gear 13 [19].

In early versions of medium-sized cone crushers, the outlet was adjusted by a hydraulically driven ratchet mechanism. Spring blocks were used to dampen vibrations of the stationary cone. Today, such crushers are also widely used.

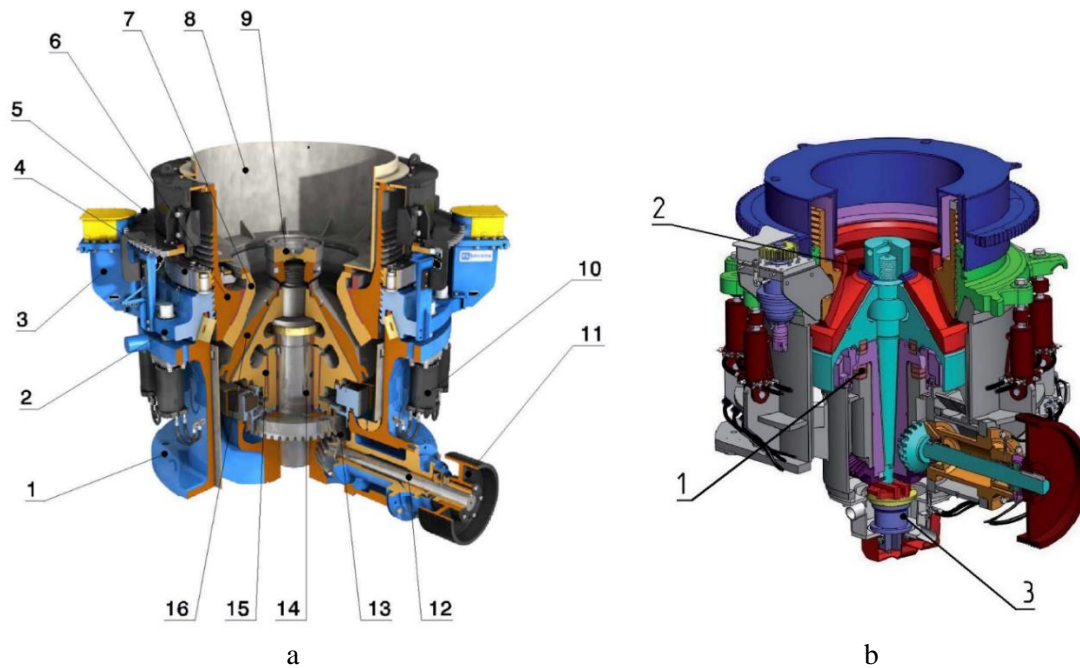


Fig. 6. Structure of a cone crusher:

- a - medium crushing type Symons (1 - frame; 2 - hydraulic unloading system; 3 - hydraulic drive for changing the size of the outlet opening (CSS); 4 - locking threaded ring; 5 - drive flange; 6 - external fixed cone; 7 - lining of the fixed cone; 8 - loading chute; 9 - locking flange; 10 - hydraulic cylinder; 11 - pulley; 12 - drive shaft; 13 - bevel gear; 14 - conical shaft; 15 - movable cone; 16 - lining of the movable cone)
- b - shallow crushing type Telsmith (1 - gyration rolling disc; 2 - wear-resistant cap; 3 - locking tooth)

In terms of structure, fine cone crushers are similar to medium cone crushers, Fig. 6, b. In foreign literature, one can find a classification of medium and fine cone crushers according to the Symons and Telsmith types. These two types include large sizes, which can be attributed to medium crushers by the size of the crushing chamber and CSS, and also include smaller sizes, which can be attributed to fine crushers. The main difference between these two types of crushers is the shape of the crushing chamber and the method of supporting the moving cone.

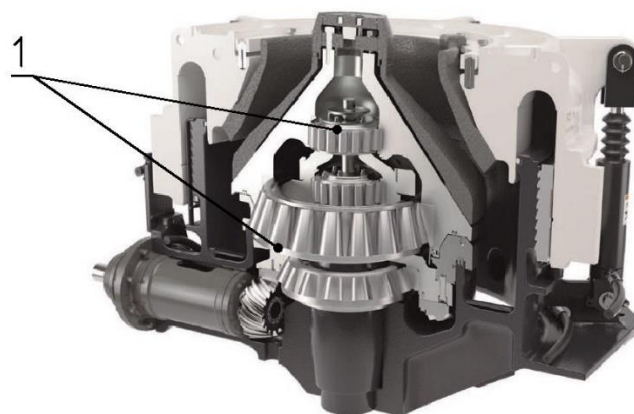


Fig. 7. Terex cone crusher:  
1 – tapered roller bearings

Classically, Symons type cone crushers use a spherical sliding support of the inner (moving) cone, Fig. 6, a. At the same time, in Telsmith type cone crushers, the support of the inner cone is a gyration rolling disc 1, Fig. 6, b, which is rigidly connected to the drive eccentric bushing. In addition, the shaft of the moving cone is equipped with a tooth located on its shank. The tooth engages

with the corresponding tooth on the bottom of the crusher housing 3, as a result of which the rotation of the cone around its axis is made impossible due to the clamping of the shaft by the drive eccentric, and the displacement of the moving cone on the sliding support bearings at high speeds is neutralized. These design solutions allow to increase the number of circular oscillations of the cone and the degree of crushing [5]. The degree of crushing in the crushers shown in Fig. 6, b can reach 6. In the crusher shown in Fig. 6 instead of a flange with a disk, the movable cone is clamped from axial movement by a special wear-resistant cap 2.

The criteria evaluation of modern models of cone crushers is carried out according to the same parameters as for the jaw crusher. The corresponding histograms are presented in Fig. 8.

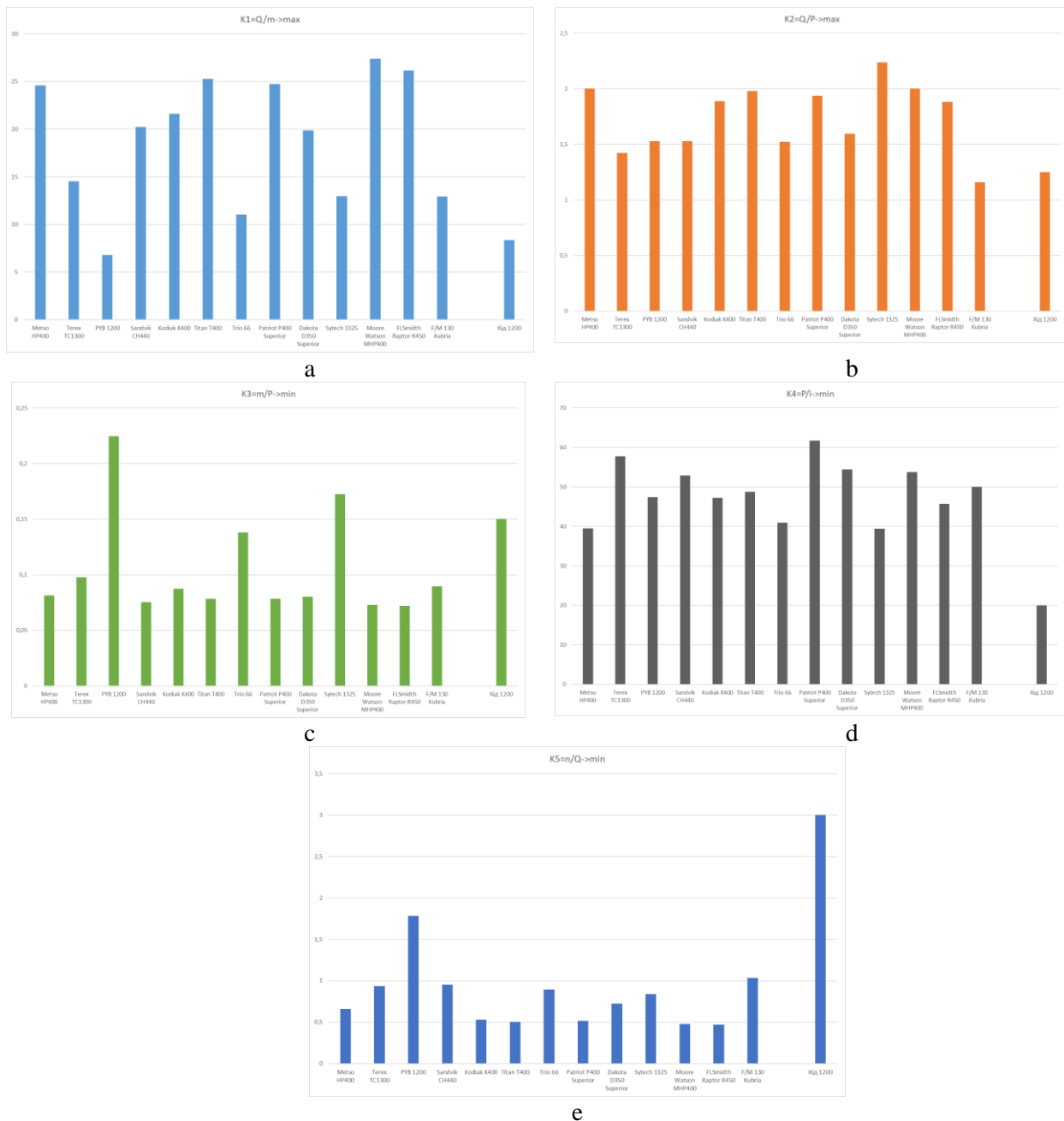


Fig. 8. Histograms of influence coefficients for cone crushers: a - productivity per mass; b - productivity per power; c - mass per power; d - power per crushing degree; e - cone oscillation frequency per productivity

The main disadvantages of cone crushers are: 1) ellipticity and non-concentricity of the crushing plates of the cones; 2) increased radial clearances in the eccentric drive mechanism; 3)



sensitivity to uneven loading; 4) limited frequency of oscillations of the moving cone; 5) lack of means of quantitative optimization of the feed.

The most efficient crushers in terms of coefficients K1-K3 are cone crushers from Metso, Moore Watson and FLSmidth. The best results are obtained in the cone inertial crusher for parameter K4. According to coefficient K5, the difference between the inertial and eccentric models of crushers is smaller compared to jaw crushers.

**Roll crushers.** Roll crushers are designed for medium and fine crushing of materials of different strengths. The working element of the roll crusher is a roller. Roll crushers with one and two rollers are common.

On Fig. 9, a shows the structure of two roller crushers. The crusher consists of two parallel cylindrical rollers 1, rotating towards each other. A piece of material entering the crushing space between the rollers is captured by friction against the surface of the rollers and is then crushed. The surface of the rollers can be smooth, grooved or toothed. The rollers are mounted on a frame 2 in bearings 3. The bearings of one roller have springs 5, which are compressed when an uncrushed object enters the working space. As a result, the moving roller moves away from the stationary one and the object passes between them through an enlarged gap. To adjust the outlet in the crusher, a mechanism 5 is used, which has a hydraulic drive and moves one roller in the horizontal direction [20].

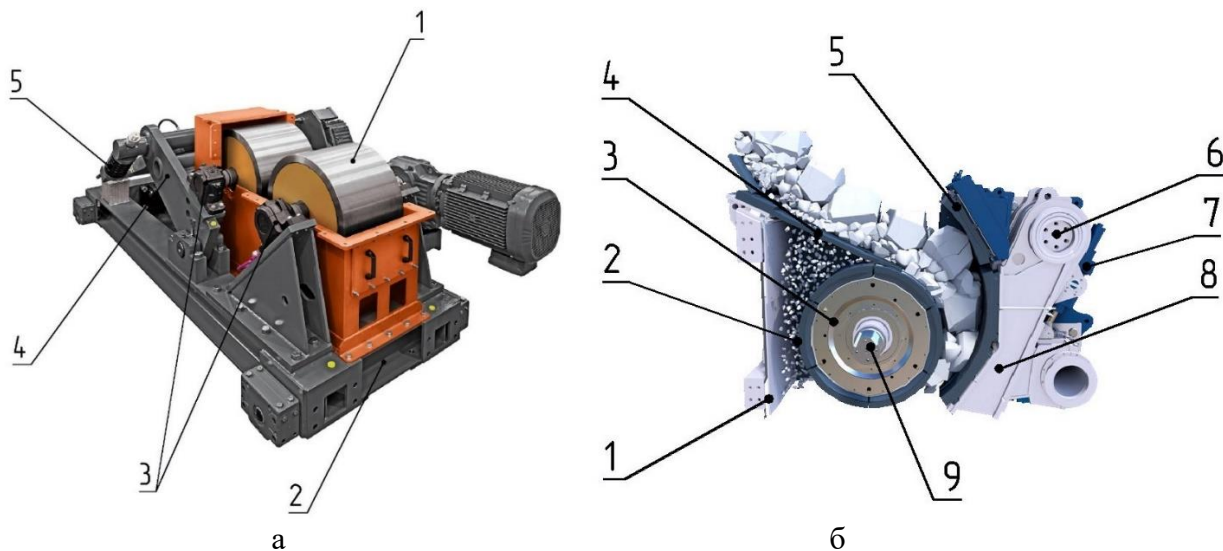


Fig. 9. Structure of a roller crusher:  
a - Siebtechnik Tema; b - FLSmidth

The frequency of rotation of the rolls is usually the same, but there are crushers with different frequencies of rotation of the rolls. They are used for crushing relatively soft material [17].

The degree of crushing of medium and high-strength rocks in two-roll crushers is 3...4, and soft rocks - up to 10. The strength of rocks crushed in roll crushers does not exceed 70 MPa with corrugated rolls and 130 MPa with smooth rolls.

The advantages of roll crushers are simplicity of construction and reliability in operation. The disadvantages of roll crushers include low productivity, while the strength of the crushed material is limited. Therefore, roll crushers require continuous and uniform feeding along the entire length of the roll.

On Fig. 10, b shows an eccentric roller crusher. The crusher consists of a frame 1 to which a grate screen 2 is hingedly fixed at one end. The grate screen is freely placed in the grooves of the lined segment plates 3 of the roller 4 with the other side. The roller 4 is mounted on an eccentric shaft 5, which is driven by an electric motor through a belt drive. Due to the circular oscillations of the roller 3, the material that falls on the grate screen is sieved and the fine fraction smaller in size than the size of the holes between the grates falls down under its own weight without passing

through the crushing chamber. At the same time, when the grate screen 2, which has a certain angle of inclination, vibrates, the material enters the crushing chamber of the eccentric roller crusher. When the roll 3 moves in the direction of the fixed cheek 5, which is lined with plates 6 and fixed on the axis, the material is crushed. The outlet opening is adjusted, as well as the passage of uncrushed material is carried out by the hydraulic drive 7 of the fixed cheek.

A common type of roller crusher is the high-pressure grinding roll (HPGR). This type of roller crusher was developed by Schonert [21]. This type of crusher has high compressive forces. Today, there is a tendency to replace medium and fine cone crushers with HPGR roller crushers. HPGR crushers are widely used in the field of enrichment.

In high-pressure crushers, the material to be crushed is crushed due to compression that exceeds the compressive strength of the material, as well as due to interparticle fracture. That is, when a large amount of material is held between the rolls and subjected to high pressure, that is, grinding can occur due to compression forces and due to interparticle fracture. To ensure interparticle fracture of the material, the condition of exceeding the pressure of the rolls above the compressive strength of the material must be clearly met. In studies [22,23] it was found that in the process of crushing the material by applying large compressive forces to the material, the total energy spent on the destruction process will be less than in crushing machines where impact loads prevail.

The working principle of the high-pressure roller crusher is as follows. At the initial stage, when the material is fed to the working space between the rolls (the size of the material is larger than the gap between the rolls), it undergoes ordinary destruction due to compression and friction forces. Then, due to gravity and friction forces, the material falls directly into the gap between the rolls, where it undergoes significant compression, as a result of which many particles are destroyed and compacted, which leads to the transfer of a larger number of interparticle compression forces, which further destroy the particles. Due to significant compaction at the exit of the crusher, a product is obtained in the form of a continuous ribbon. After that, the continuous product is loaded into the mill for its dispersion.

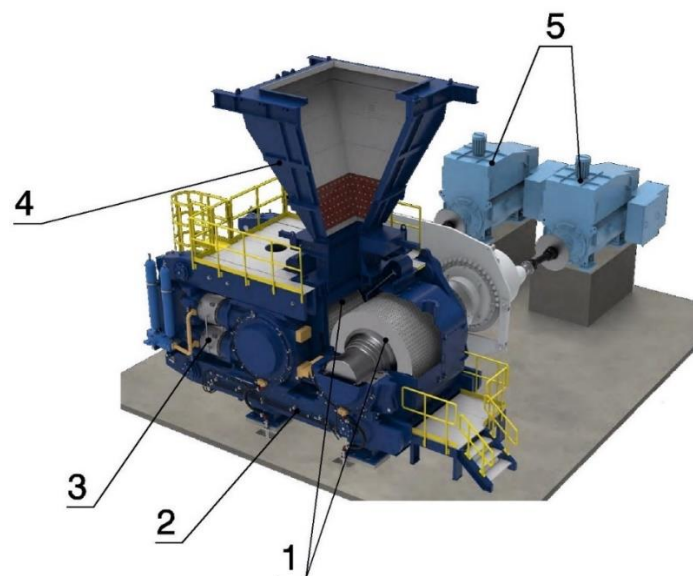


Fig. 10. Structure of the HPGR high-pressure roller crusher:  
1 – rollers; 2 – frame; 3 – hydraulic cylinders; 4 – feeder; 5 – drive motors

Significant compression forces in HPGR type roller crushers are created by hydraulic cylinders that press the moving roller against the stationary one and regulate the gap between the rollers. The crushing pressure in such crushers varies from 50 MPa to 250 MPa. The dimensions of the rollers vary within 0.7 - 2.8 m with a length to diameter ratio of 0.2 to 0.6. The speed of the rollers is taken within 85-100 rpm. The productivity of such crushers varies from 20 t/h to 750 t/h. Fig. 10 shows the structure of the HPGR high-pressure roller crusher.

The HPGR crusher consists of a frame 2 in the bearings of which the rollers 1 are installed. One of the rollers is stationary, and the other, on the contrary, can move in the horizontal direction by moving the rods of the hydraulic cylinders 3. Thus, the necessary pressure is created in the working space of the crusher for the destruction of the material. For uniform supply of material to the working space of the rollers, a feeder 4 is mounted on the crusher frame. The crusher is driven by electric motors 5.

Fig. 12 presents histograms of the criteria evaluation of roll crushers.

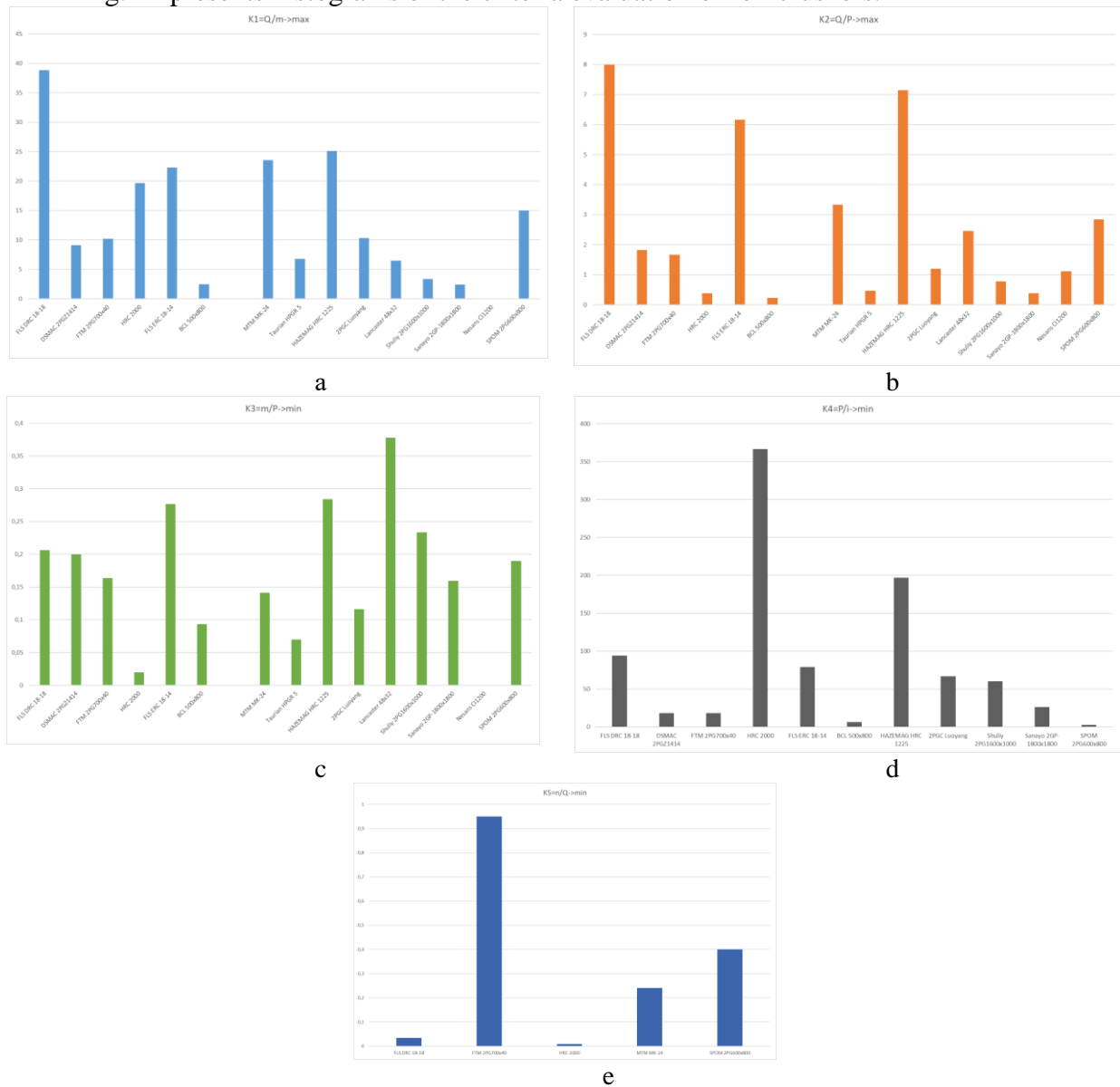


Fig. 11. Histograms of influence coefficients for roller crushers:

a - productivity per mass; b - productivity per power; c - mass per power; d - power per crushing degree; e - speed per productivity

Based on the criteria assessment, it can be noted that the best designed crushers are those made by FLSmidth, Hazemag, and Metso. In general, the most popular roll crushers are HPGR high-pressure crushers, which are mainly used in the processing of solid materials, especially in the enrichment sector. However, roll crushers with smooth rolls are still used only for medium and shallow crushing, which is associated with the geometry of the working surfaces. That is, the ratio between the roll diameter and the source material is within 1: (17-20). This indicates that in order to obtain material fractions of 75 mm, a roll crusher of considerable mass is required. Of course, this ratio is smaller when using corrugated roll surfaces and is 1: (2-6). A promising design of a roll crusher today is an eccentric roll crusher, which is manufactured by FLSmidth. By combining the

design of the roll and jaw, it was possible to increase the productivity of such a crusher, eliminate dust clogging of the crushing chamber and its overloading, reduce energy consumption, and increase the degree of crushing.

**Impact crushers.** The principle of operation of impact crushers is based on the destruction of the material entering the crusher by the mechanical impact of the rotating working elements and the crushing of the discarded pieces of material against the impact plates installed in the middle of the crushing chamber.

Impact crushers are designed for coarse, medium and fine crushing of materials with a strength of up to 200 MPa. The main unit of the impact crusher is the rotor, which has a large mass and a rotational speed of up to 80 m/s, which ensures effective crushing of the material.

The advantages of impact crushers are simplicity of design, reliability in operation, low energy consumption, relatively higher product quality, the degree of crushing can reach 40. The disadvantages include the high intensity of operation of the working elements.

Impact crushers can be classified into two groups: 1) rotary crushers; 2) hammer crushers [24].

Hammer crushers come with one or two rotors, reversible and non-reversible, with or without a grate. In hammer crushers, the working elements are hammers, which are hingedly mounted on a disk-rotor rotating at high speed.

Rotary crushers can be classified into two groups: 1) horizontal shaft rotary crushers (HSI); 2) vertical shaft rotary crushers (VSI or centrifugal impact crushers).

In horizontal shaft rotary crushers, the working elements are hammers, which are rigidly mounted on a rotating rotor; in this case, the impact force on the material is determined by the total mass of the rotor and hammers.

Let us consider the structure of the hammer crusher, which is presented in Fig. 12. A single-rotor hammer crusher consists of a rotor 1, a housing 2, a baffle plate 4, a grate 3. The rotor is driven by an electric motor through an elastic coupling. The inner walls of the housing are lined with replaceable plates 6. A spring mechanism 5 is provided to protect the crusher from clogging. Hammers 7 are hingedly mounted on the rotor shaft.

The main parameters of the hammer crusher are: 1) rotor diameter; 2) rotor length; 3) hammer length; 4) productivity; 5) power.

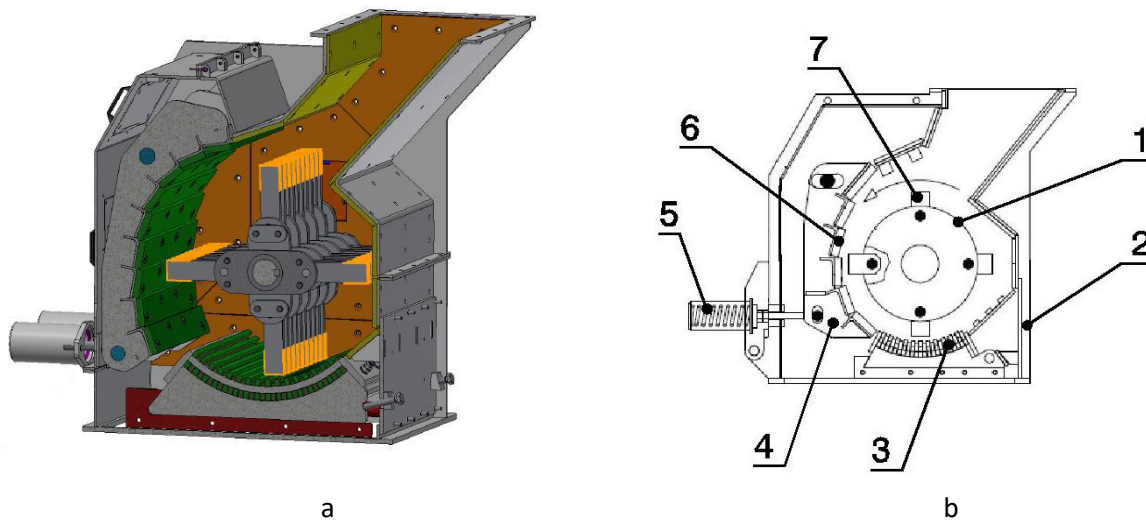


Fig. 12. Single-rotor hammer crusher:  
a – section; b – diagram

The structure of a horizontal shaft rotary crusher (HSI) is shown in Fig. 13, a. The principle of operation of a horizontal shaft rotary crusher (HSI) is as follows. The output material enters the rotor 9 rotation zone via a tray 8, where it is subjected to impact loads from the rotor 9 blades 2. The crusher crushing chamber is formed by the rotor 9 and the impact plates 6. The impact plates have linings 7. To adjust the degree of crushing, the distance between the lower edges of the impact plates

and the rotor blades is changed using spring-loaded rods 5, which simultaneously play the role of a protective mechanism for the machine against damage when the crushing chamber is clogged with either oversized material or non-crushed material. For ease of maintenance, the upper part of the crusher housing is detachable. In this regard, the crusher is provided with a jack mechanism 4 for moving the upper part of the housing. A pulley 1 is installed on the cantilever part of the rotor 9 of the crusher, from which the crusher is driven by a belt drive and an electric motor.

The main design parameters of the HSI rotary crusher are: 1) rotor diameter; 2) rotor length; 3) energy consumed for material destruction; 4) power; 5) productivity [25].

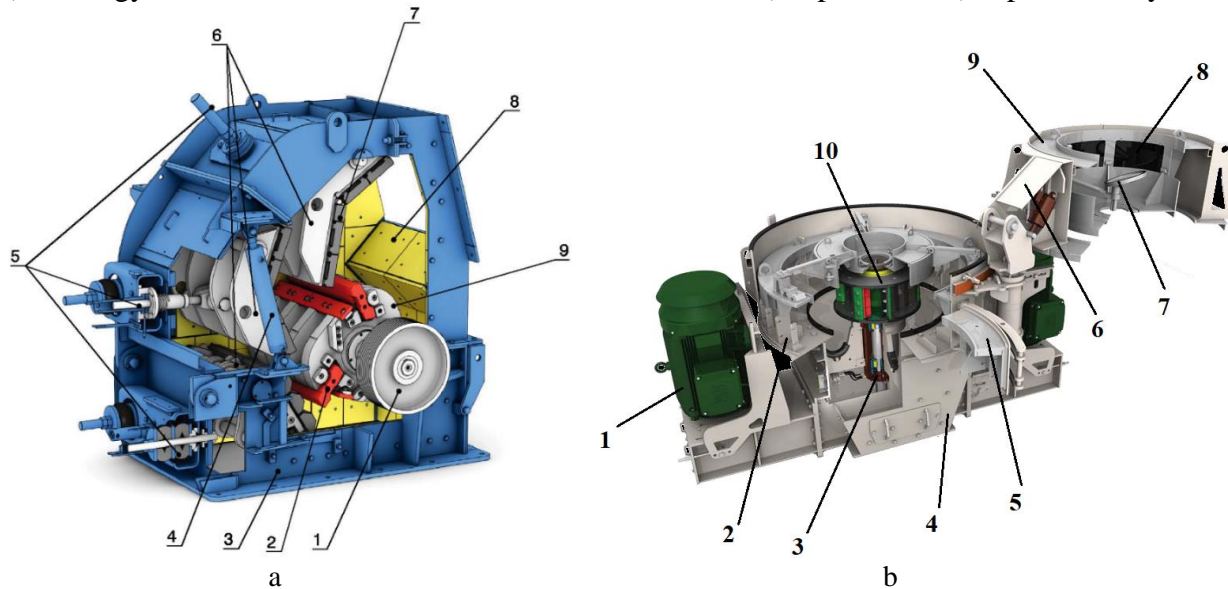


Fig. 13. Structure of a rotary crusher:

a – with a horizontal shaft HSI (1 – pulley; 2 – hammer; 3 – frame; 4 – jack mechanism; 5 – rods; 6 – impact plate; 7 – lining; 8 - tray; 9 – rotor); b – with a vertical shaft VSI or centrifugal impact (1 – engine; 2 – impact frame; 3 – shaft; 4 – frame; 5 – inspection hatch; 6 – cover lifter; 7 – device for adjusting the angle and height of the distributor plate to adjust the power supply; 8 – windows that are adjustable for the passage of material; 9 – cover; 10 – rotor)

Rotary crushers with a vertical shaft VSI have a significant difference from rotary crushers with a horizontal shaft HSI. In foreign classification, rotary crushers are classified according to the action of the working body on the material and the destruction process itself. Therefore, such crushers have a common name - impact crushers with either a horizontal shaft (HSI) or a vertical shaft VSI. If we consider hammer crushers, then according to the existing design they also come with a horizontal shaft and a vertical shaft. However, due to the absence of significant differences in the designs of hammer crushers, the emphasis on classification by shaft location is not made.

Within Ukraine, VSI vertical shaft rotary crushers are better known as centrifugal impact crushers. A vertical shaft rotary crusher implements the principle of material destruction by free impact in a field of centrifugal forces. The main element of centrifugal impact crushers is the rotor, which is located on a vertical shaft [26]. The rotor is equipped with accelerating elements in the form of internal channels of complex shape. The material to be crushed is fed into the central part of the rotor, accelerated by the accelerating elements and thrown at high speed onto the reflecting surfaces located on the periphery of the crushing chamber, where it is destroyed upon impact.

In a crusher of this type, material crushing is implemented according to 3 different schemes: impact with an obstacle, impact of pieces with each other, and impact with moving structural elements.

The main difference between centrifugal impact crushers and other impact devices is that the crushing action is almost completely shifted from the rotating working body to the peripheral reflecting surface. The rotor performs only the dispersing function. Fig. 14, a shows the principle of operation of the centrifugal impact crusher, and Fig. 14, b shows the rotor design.

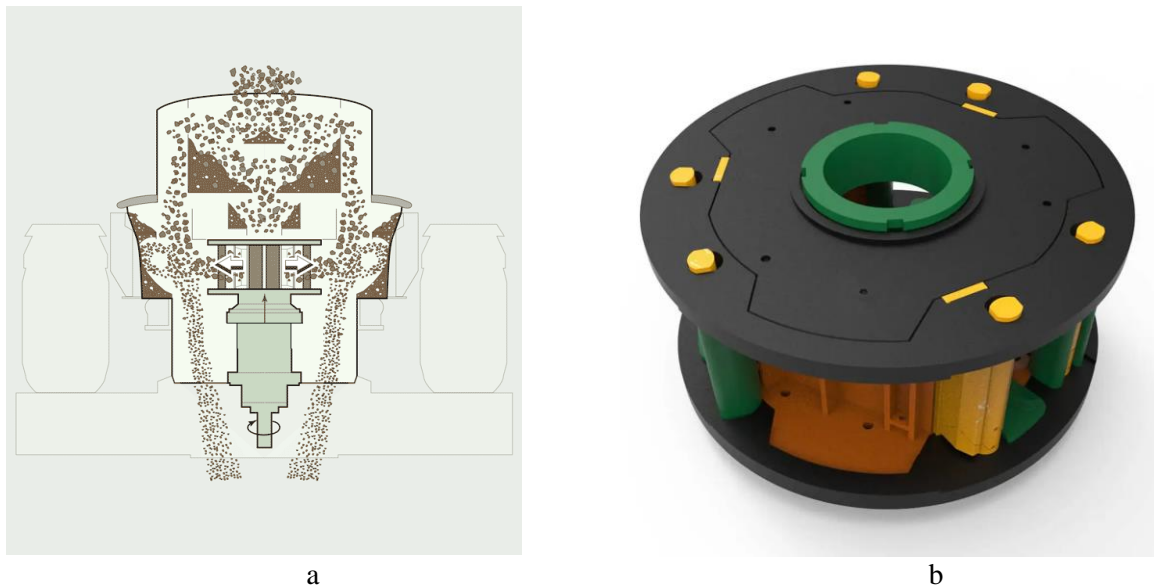


Fig. 14. VSI centrifugal impact crusher:  
a – working diagram; b – rotor

In centrifugal impact crushers of the VSI type, two material destruction schemes can be used. The first scheme is the classic one, in which the material accelerated by the rotor hits the inner wall of the crusher housing at high speed, as a result of which it undergoes destruction. This scheme is called “stone on metal”. The inner wall of the crusher housing is lined. The second scheme is called “stone on stone”. In this scheme, part of the material that is fed into the crusher feeder through special windows is directed into the space between the rotor and the inner housing of the crusher. This process of feeding the crusher is called cascade feeding. That part of the material that enters the rotor is accelerated in the rotor and, flying out of the rotor at high speed, meets the material that was directed outside the rotor. As a result of the impact of one particle of material on another freely falling particle of material, their mutual destruction occurs.

It should also be noted that the inner lined wall of the crusher, which is located parallel to the rotor outlet holes, has recesses in the form of pockets. These recesses are made to create a self-lining layer. Such a layer is formed by clogging the pocket with material that flies out of the rotor at the initial stage of the crusher's operation. This leads to an increase in the service life of the lining plates of the inner walls of the crusher.

Today, the company produces a wide range of centrifugal impact crushers. The power of such crushers ranges from 37 kW to 600 kW, and the productivity from 40 tons/h to 775 tons/h. The size of the feed product ranges from 30-64 mm. The basic design of the Barmac VSI series centrifugal impact crusher is shown in Fig. 13, b.

In the Barmac VSI series crusher, it is possible to vary the following parameters: 1) change the rotor rotation speed; 2) select the type of crushing chamber profile; 3) adjust the ratio of material flows in the cascade feed system; 4) select the rotor diameter.

Figure 15 shows the criteria for evaluating impact crushers. HSI, VSI, and hammer crushers were included in the analysis.

The best designs based on the criteria analysis in Fig. 15 are possessed by rotary crushers from Metso, TelSmith and Sandvik.

The difference between horizontal shaft rotary crushers and hammer crushers, in addition to the design features of the rotor, is as follows: 1) rotary crushers are designed for crushing hard and wet materials, while hammer crushers are used for large-scale and high-performance production lines that process medium-hard materials with a moisture content of no more than 10%; 2) a rotary crusher is usually used for secondary crushing and requires additional equipment for the first crushing stage (jaw crusher), a hammer crusher can be used for single-stage crushing; 3) a hammer crusher is prone to clogging of the crushing space due to being equipped with a lower sieve plate;

4) a hammer crusher has higher productivity; 5) the degree of crushing is higher in a rotary crusher (can exceed 50, this applies to crushers with a vertical shaft); 6) in hammer crushers, the wear of the hammers is more significant than that of the working elements of the rotor in a rotary crusher.

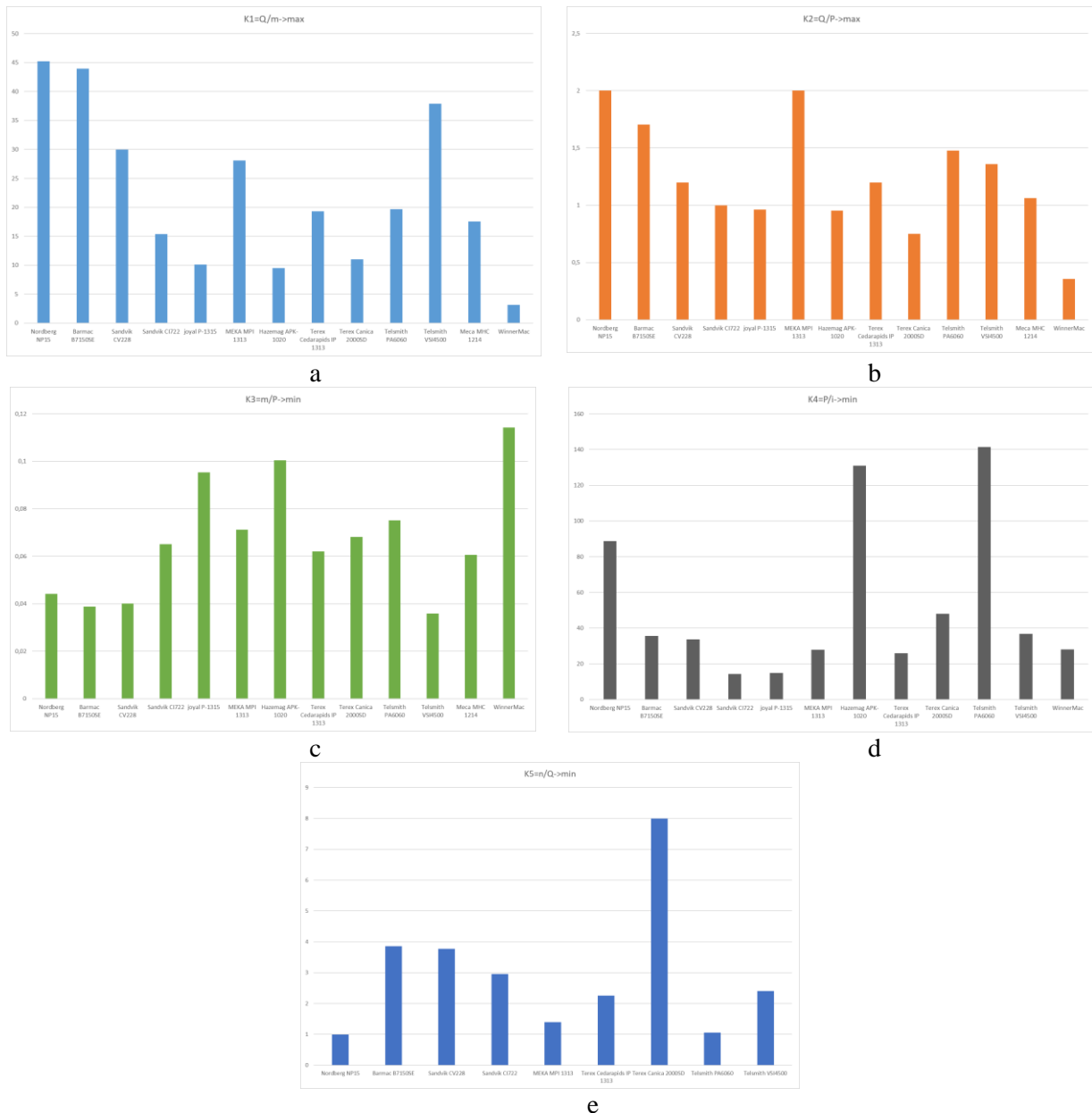


Fig. 15. Histograms of impact coefficients for impact crushers:  
 a - productivity per mass; b - productivity per power; c - mass per power; d - power per degree of crushing;  
 e - speed per productivity

Separately, among the features of horizontal shaft rotary crushers, one can highlight the possibility of selective crushing. That is, the finer material is screened out through the grates and does not enter the crushing chamber, which leads to a uniform output of the product with the same strength, reduced energy consumption and no clogging of the crushing chamber. The advantages of vertical shaft rotary crushers are increased productivity with a relatively small weight of the structure, a high degree of crushing and an increased service life due to the formation of a lining layer of crushing material during the operation of the machine.

Among the promising designs of hammer crushers is a crusher with a hinged vertical rotor [4]. The productivity of such crushers can reach 100 t/h and process materials of medium strength. The advantages of such a crusher include the possibility of cascade feeding, flexible control of the degree of crushing, control of crushing energy, ease of replacement of working elements. On the

other hand, this design of the crusher is still at the stage of experimental research and has not been launched into series. Another promising design of the hammer crusher is the DIM-800k. This crusher uses an active method of impact crushing. The design of the crusher includes 3 rotors - one guide and two deflectors. The material entering the crushing chamber is accelerated by the guide rotor, after which it is thrown onto the deflector rotors. The maximum degree of crushing can reach 200. The maximum productivity is 120 t/h.

**6. Conclusions.** The types of crushing machines that have the most advanced design were identified. The design features of crushers, the advantages and disadvantages of individual types of crushing machines, and the directions of their development were considered.

For jaw crushers, the main areas of development are: 1) optimization of the crusher design; 2) improvement of the surface geometry of the crushing plates; 3) development and creation of modular crushing units based on the jaw crusher, which include the jaw crusher (mobile crushing and crushing-sorting complexes, crushing buckets, etc.); 4) change of the crusher kinematics in order to create a vibration or impact effect on the material; 5) development and improvement of hydraulic systems for adjusting the parameters of the mechanical mode.

In cone crushers, the main directions are: 1) development and improvement of hydraulic systems for regulating the parameters of the mechanical mode; 2) development and improvement of the design and support of the moving cone; 3) creation of inertial and vibration cone crushers; 4) improvement of the geometry of the crusher's working elements.

Directions for the development of roller crushers: 1) creation of high-pressure rollers with a massive frame for large production volumes; 2) development and improvement of a synergistic design that combines an eccentric cheek and roller; 3) improvement of the geometry of the crusher's working elements.

Among impact crushers, horizontal and vertical shaft rotary crushers (HIS, VSI) have become widespread, and work is underway to create and improve the designs of vertical shaft hammer crushers and those with an active impact crushing method. The following are promising areas of development: 1) optimization of the crusher design; 2) improvement of the kinematic characteristics of the rotor; 3) improvement of the geometry of the rotor's working elements (hammers, billets).

## References:

1. J.A. Hudson, J.P. Harrison, *Engineering Rock Mechanics*, Pergamon, Oxford, 1997.
2. Nazarenko I.I. (1999). *Mashini dlja virobnictva budivel'nih materialiv: Pidruchnik (Machines for the production of building materials: Textbook)*, K.:KNUCA, p. 488.
3. Refahi A., Mohadesi J.A., Rezai B., 2009, Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation, *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, 109, 709-717.
4. Tomislav Korman, Gordan Bedeković, Trpimir Kujundžić, Dalibor Kuhinek [2015] Impact of physical and mechanical properties of rocks on energy consumption of Jaw Crusher. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. January 2015;51(2):461–475. DOI: 10.5277/ppmp150208.
5. Refahi A., Mohadesi J.A., Rezai B., 2009, Comparison between bond crushing energy and fracture energy of rocks in a jaw crusher using numerical simulation, *J. South. Afr. Inst. Min. Metall.*, 109, 709-717.
6. Robert C.Dunne (2019) *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, USA, p. 2258. ISBN 978-0-87335-385-4.
7. Numbia B.P., Zhanga J., Xia X., Optimal energy management for a jaw crushing process in deep mines, *Energy*, 15 April 2014, Vol. 68, 337–348, <http://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.100>.
8. 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>
9. Yevhen Mishchuk, Ivan Nazarenko (2023) Analysis of the energy laws of material destruction. *Strength of Materials and Theory of Structures*. No 110. p. 294-315. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.110.294-315>.
10. Paweł Ciężkowski, Jan Maciejewski, Sebastian Bąk (2017) Analysis of energy consumption of crushing processes – comparison of one-stage and two-stage processes. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 39, No. 2, 2017. DOI: 10.1515/sgem-2017-0012.



11. C. Okechukwu<sup>1</sup>, 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>
12. G. Kirankumar (2014) Optimization of Jaw Crusher Advance Research and Innovations in Mechanical, Material Science, Industrial Engineering and Management - ICARMMIEM-2014. ISBN 978-93-82338-97-0
13. Kostiantyn Zabolotnyi, Olena Panchenko E3S Web Conf. Volume 109,00120, 2019. International Conference Essays of Mining Science and Practice. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900120>
14. 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.
15. 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>
16. Nazarenko I.I., Mishchuk Y.O., V.V. Kuchinsky (2016) Evaluation and analysis of the main design schemes of cone crushers. *Mining, construction, road and land reclamation machines*. No 88. – p. 47–55.
17. Marcin Mazur Determination of crushing energy during vibratory crushing *New Trends in Production Engineering – Volume 2, issue 1, 2019*. DOI 10.2478/ntpe-2019-0030.
18. Sidor J., Mazur M.: Comparative studies of vibratory crushing process performed in jaw crushers, *Ceramic Materials*, ISSN: 1505-1269. t. 67 nr 1, p. 62-66, 2015.
19. Taggart, Arthur F “Hand Book of Ore Dressing”, John Willey & Sons Inc, 1998, Pages 255-280.
20. James R. Couper, W. Roy Penney, James R. Fair, Stanley M. Walas (2005) *Chemical Process Equipment. Selection and Design*. Second Edition. Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA. ISBN: 0-7506-7510-1.
21. Schönert K. In: Somasundaran P, editor. *Advances in mineral processing*. New York SME/AIME; 1986. p. 19–31. [Chapter 1].
22. 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.
23. Larison, B.W. *Aggregate Production Modeling Using Neural Networks and Belief Networks*. Master’s Thesis, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, 1999.
24. Egbe, E.A.P., Olugboji, O.A. Design, Fabrication and Testing of a Double Roll Crusher. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)* – Volume 35 Number 11 - May 2016.
25. Swapan Kumar Haldar *Mineral Exploration Principles and Applications*. 2018 Elsevier Inc. 352 p. ISBN: 978-0-12-814022-2.
26. SOKUR, M.; BILETSKYI, V.; SOKUR, L.; BOZHYYK, D.; SOKUR, I. Investigation of the process of crushing solid materials in the centrifugal disintegrators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, [S. l.], v. 3, n. 7(81), p. 34–40, 2016. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71983>.

УДК69.00.25

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0404>**Володимир Слюсар**

Phd student,

Assistant at the Department of Machinery and Equipment for Technological Processes,  
Kyiv National University of Construction and Architecture,

31 Air Forces Avenue, Kyiv, 03037, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4332-3144>E-mail: [sliusar.vs@knuba.edu.ua](mailto:sliusar.vs@knuba.edu.ua)**METHODOLOGY FOR EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE DISTRIBUTION OF ENERGY IN THE ELEMENTS OF THE «VIBRATION MACHINE – COMPACTING CONCRETE MIXTURE» SYSTEM**

**Abstract.** *The paper presents a methodology for experimental research on the distribution of energy in the elements of a vibration machine for compacting concrete mixtures. The development of this methodology is based on a thorough analysis of existing research methods and the determination of energies in mechanical systems and media. Within the general system of the "vibration machine – compacting concrete mixture," the following subsystems were identified: bearings of the vibration exciter, supports, vibration dampers, reactive and active masses, including the form mass and the compacting concrete mixture. Specific research methods for energy dissipation were determined for each of the mentioned subsystems, preceding relevant modeling. Energy dissipation depends on many factors: the composition and structure of the material, cyclic deformation and stresses arising from the medium's exposure, the type and parameters of the load, the duration of cyclic deformation, and more. The evaluation criterion for energy dissipation in media is the energy absorption coefficient, which expresses the ratio of energy used to perform the technological process of compaction to the potential energy. The ratio of these energies is considered an independent material characteristic, determined experimentally, taking into account actual technological and operational factors. It was found that the following main methods are used to evaluate energy parameters: phase, damping oscillations, hysteresis loops, energy, and resonance methods. The paper substantiates the methodology for experimental research of parameters and energy indicators of concrete mixture compaction processes. Two models—discrete and continuous—were used in the simulation of these processes.*

**Keywords:** *research methods, energy dissipation, experiment, concrete mixture, vibration machine, vibration parameters, amplitude, stress frequency, deformation.*

**1. Introduction.** Modern requirements of the construction industry involve the use of machines and technologies that minimize energy consumption while achieving high-quality technological processes [1]. Among the various processes employed, significant roles are played by transportation, crushing, sorting, mixing, and compacting with the application of vibration [2]. The operation of any machine involving vibration, performing a material processing task, can be represented as an energy flow: the energy source, the machine drive, converts one type of energy into another (usually electrical to mechanical) and delivers it to the working unit. The drive includes an energy converter, a transmission, and a motion transformer. Thus, any technological process requires energy expenditure. In the general system "vibration machine – processing medium," corresponding subsystems exist: bearings of the vibration exciter, supports, vibration dampers, reactive and active masses, including the form mass and the processing medium. Each of these subsystems absorbs part of the energy, making the task of minimizing energy consumption across all subsystems while ensuring high-quality technological process execution highly relevant.

**2. Analysis of literature data and problem statement.** In the current state, several different approaches are used to study energy, which differ from each other in approaches to definition and the accepted type of mathematical model reflecting the behavior of a vibrational system [1]. Thus, the phase method is based on determining the phase shift angle between the external harmonic force [1] acting on the vibrational system and the movement of this system caused by it, or the deformation of the material, on which the force acts during oscillations. At the same time, this method is integral and it is not effective to separate into subsystems. The method of attenuating oscillations [1] consists in recording vibrograms of free attenuation oscillations of the system, according to

which the logarithmic decrement of oscillations can be determined, which is related to the energy absorption coefficient by a certain ratio [1]. This method has the same drawback as the phase method and, moreover, it is rational for use in systems with low values of energy dissipation in the system. The energy method is based on the direct measurement of the flow rate of electrical or mechanical power of the vibration exciter to maintain constant oscillations of the system under study [1-3]. At the same time, in the balance of the entire power of the pathogen measured, only part of the power is spent directly on maintaining the vibrations of the system under study, and the rest of the power is spent on overcoming resistances in the pathogen itself and dissipated throughout the system of the vibration system. The resonance method is based on the construction of the amplitude-frequency characteristic of the vibration system in the resonance zone and the determination of the values of the relative energy dissipation coefficients [4]. The method of dynamic hysteresis loop consists in simultaneously registering stress and strain and graphically reproducing the relationship between stress and corresponding strain in the form of an experimental hysteresis loop [1], the area of which characterizes the dissipation of energy in the material. This method allows you to determine the energy directly for the process of vibration treatment, which is used in the work to determine the energies for compaction of the concrete mixture. The considered methods and their application in experiments indicate a significant discrepancy in the obtained values of parameters and characteristics that determine the scattering of energies and explain their relativity. The known calculated ratios for determining dissipative forces (vibration attenuation method, phase angle method, etc.) are based on the proposal of the laws of change of these forces (resistance proportional to the first power of the oscillation velocity). Since there is still no generally accepted model of a vibrating medium, it is advisable to use methods that allow you to directly determine resistance forces. Significant studies performed in the works [5-7] outlined the importance of the influence of the processing medium on the dynamics of the machine [8-10]. Therefore, the solution of the problem in determining the reality of the energy value is to substantiate a method that adequately reflects the real process and makes it possible to determine all the components of the energy absorbed by each subsystem of the general system "vibration machine - processing medium".

**3. Purpose and objectives of the study.** The purpose of the study is to select a research methodology and determine the distribution of energy in the elements of the system "vibration machine - compaction concrete mixture". To achieve the goal of the study, the following tasks are defined:

- substantiation and selection of the method of energy research in the elements of the system "vibration machine - compaction concrete mixture";
- development of a methodology and program for conducting an experimental study of energy in the elements of the system "vibration machine - compaction concrete mixture".

**4. Justification and selection of the method for studying energy in the elements of the system "vibration machine - compaction concrete mixture".**

**4.1. With general approaches and prerequisites for determining energy research methods.** Energy dissipation depends on many factors: the composition and structure of the material, cyclic deformation and stresses that occur when acting on the medium, the type and parameters of the load, the duration of the cyclic deformation and other properties and characteristics. The parameters that determine the fraction of energy per resistance and found by different methods are in the following ratios [1]:

$$\gamma = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\psi}{2\pi} = \frac{bT}{2\pi m} = \frac{T}{\pi\tau} \quad (1)$$

where:  $\gamma$  – is the coefficient of resistance;  $\psi = \Delta w / w$  – energy absorption coefficient for one period in a unit volume of material;  $\Delta w$  – dissipated energy;  $w$  – is the energy supplied to the material;  $m$  is the oscillating mass;  $\tau$  – is the relaxation time of the system with a decrease in the amplitude of oscillations by a factor of  $e$ .

In the general system "vibration machine – compaction concrete mixture", the corresponding subsystems were defined: oscillator bearings, supports, oscillation limiters, reactive and active masses,

including mold mass, compaction concrete mixture. The following prerequisites and assumptions are accepted for each of these subsystems[3].

1. It is believed that the working body, which consists of masses: the oscillation exciter and the frame, as well as the shape, are systems with discrete parameters, in which the energy dissipation, both in the idle mode of oscillations and when loaded with a concrete mixture, does not change, but the difference in friction in the bearings is taken into account by the mass of the concrete mixture added in the compaction mode.

2. Compaction concrete mix is a system with distributed parameters.

3. Dependencies (1) will be used in the appropriate stages of the scattering study

**4.2. Simulation of the vibration process of compaction of concrete mixture.** The problem of modeling the vibration process of compaction of a concrete mixture is formulated as follows. We have a vibration platform with parameters: amplitude of oscillations,  $X_0$  and frequency of oscillations  $\omega$ ; mass  $m$  of particles of the mixture, having a density  $\rho$  and an average size  $r$ , has an average velocity  $v$  relative to the vibrating working body; friction force  $F_{\phi}$ , which occurs between particles during oscillations, is proportional to the square of linear size. It is necessary to determine the value of a certain set of parameters of the vibration system, which provide the highest value of the compaction coefficient of the concrete mixture with limited values of specific labor  $\bar{A}$  and specific power  $\bar{P}$ , which are determined by the formulas[1]:

$$\bar{A} = \frac{1}{2} x_0^2 \omega^2; \quad \bar{P} = \frac{1}{A\pi} x_0^2 \omega^3 \quad (2)$$

It is these formulas that take into account the degree of energy dissipation, which are provided for determination experimentally using the phase method and the method of dynamic hysteresis loop. In this case, it is decided that the initial parameter is the compaction coefficient:

$$K_y = \frac{\rho - \rho_0}{\rho} 100\% = \rho_c \quad (3)$$

Then the functional dependence to achieve the goal for solving the task is in the form of:

$$\rho_c = f(m_c, r, x_0 \omega, F_{TP}, t, g, \bar{A}, \bar{P}) \quad (4)$$

Using the dimensionality method [2], we get:

$$\rho_c = f\left(\frac{F_{TP}}{m x_0 \omega^2}; \frac{v}{x_0 \omega}; \omega t; \frac{x_0 \omega^2}{g}; x_c^2 \omega_c^2; x_c \omega_c^3\right) \quad (5)$$

Here  $F_{TP}/m_c x_0 \omega^2$  and  $v/\alpha \omega$  the resistance of forces and velocities is characterized, respectively; other parameters are limiting.

So

$$F_c = \frac{F_{TP}}{m x_0 \omega^2} = \frac{\mu r^2}{k \rho r^2 x_0 \omega^3} = \frac{\mu_1}{\rho r \omega v}, \quad \mu_1 = \frac{\mu}{k}, \quad k = \frac{4}{3} \pi, \quad (6)$$

that is, the ratio of the frictional force ( $\mu$  is the proportionality coefficient) to the force acting on a particle of mass  $M$  is inversely proportional to the density of the concrete mixture  $\rho$ , the amplitude of the excitation rate  $v$  of the particle size  $R$  and the frequency  $\omega$ .

The defined method of modeling the vibration process of compaction of the concrete mixture makes it possible not only to estimate the energy for compaction, but also to determine the parameters of the vibration action, which provide the highest value of the compaction coefficient of the concrete mixture.

**4.3. Simulation of the energy dissipation process in the bearing units of the exciter and in the vibration resistances of the vibration installation.**

The design scheme of the vibration unit for compaction of the concrete mixture is a single-mass system (Fig. 1, a), and a centrifugal vibration exciter (Fig. 1, b), which is installed on the ground.

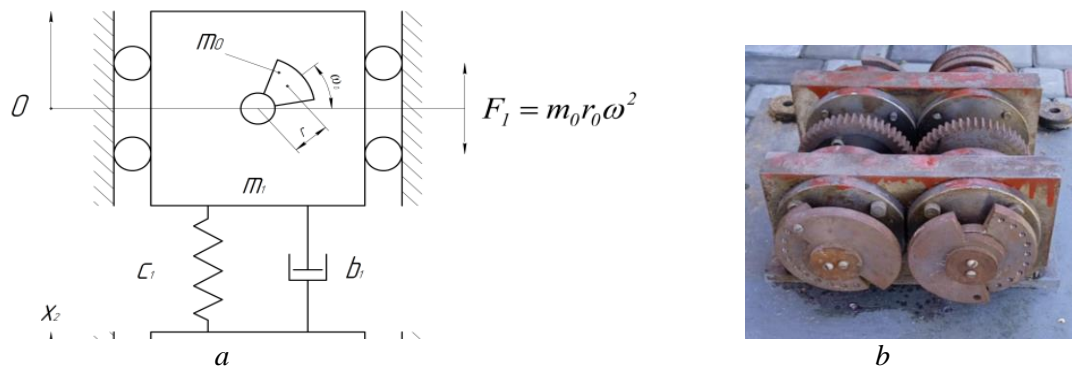


Fig.1. Calculation scheme:  
a - of the installation; b - the causative agent of oscillations

Four pairs of imbalances are fixed on two shafts of the vibration unit, rotating towards each other. In each pair, one imbalance is rigidly fixed on the shaft, and the second can be turned and fixed in relation to the first with the help of springs and a pin. This makes it possible to adjust the amplitude of vibration vibrations of the vibration unit within 0.1 to 1.0 mm. which allows you to adjust the frequency of forced oscillations from 0 to 6000 oscillations per minute. A feature of the drive is the presence of a reversible switch in the control circuit, which makes it possible to perform sharp braking of the engine and observe the behavior of the unit under study in the mode of free oscillations. The mold for the concrete mixture consists of a bottom and detachable sides, which allows you to change the geometric dimensions of the mold without changing its weight. The maximum size of the molded samples is 0.25x0.25x0.40 m. When determining the proportion of energy dissipation in the bearing units of the vibration unit, the energy method is used with the assumption that in the mode without technological load and in the mode of operation with a load, the resistance in the bearing units is the same. This assumption is due to the fact that the mass of the concrete mixture is much less than the active mass of the working body, taking into account the mass of the vibration pathogen and the mass of the mold. According to the design of supports and oscillation limiters, springs are selected that connect the masses to each other (Fig. 1,a) and rubber elements that implement vibration isolation of the installation from the foundation. Energy dissipation in elastic elements is supposed to be determined by the coefficient *b* by the method of attenuating oscillations [1]:

$$b = \frac{2\mathcal{D}}{T} M_c, \tag{7}$$

where:  $\mathcal{D}$  - is the decrement of oscillations; T- is the period of oscillations;  $M_c$  – is the total mass of the vibration installation:  $M_c = m_{p.o} + m_\phi + m_{\delta.c.}$ ;  $m_{p.o}$ - is the active mass of the working body taking into account the mass of the oscillator exciter;  $m_\phi$ - mass of the form;  $m_{\delta.c.}$  is the mass of the concrete mixture.

Determination of the geometric dimensions of supports and oscillation limiters is carried out by the static loading method. For this purpose, the length of the supports is measured in the direction of the action of the weight in an undeformed state (without load), and then the static draft of the spring is measured under the action of the weight force of the vibration system, i.e.:

$$x_{cm} = M_c g / c, \tag{8}$$

where: *c* - is the total rigidity of the supports;

From (8) we find the total rigidity of the supports:

$$c = M_c \frac{g}{x_{cm}} \quad (9)$$

### 5. Development of a methodology and program for conducting an experimental study of energy in the elements of the system "vibration machine - compaction concrete mixture".

To conduct experimental studies, an installation was designed, which consists of an oscillation exciter, two frames - active and reactive, a form with variable dimensions, supports connecting the frames to each other and supports connecting the reactive frame to the foundation. and the second can be turned and fixed in relation to the first by means of springs and a pin. This makes it possible to adjust the amplitude of vibration of the vibration platform within 0.1 - 1 mm. The drive of the vibration unit is a DC motor, which allows you to carry out the basic regulation of the frequency of forced oscillations from zero to 6000 oscillations per minute. A feature of the drive is the presence of a reversible switch in the control circuit, which makes it possible to perform sharp braking of the engine and observe the behavior of the system under study in the mode of free oscillations. The mold consists of a bottom and detachable sides, which allows you to change the geometric dimensions of the mold without changing its weight. The maximum size of molded samples is 0.3x0.3x0.5m. The experiments also used a one-piece mold measuring 0.3x0.3x0.4 m.

Table 1 Composition of concrete mixtures

Composition No.	Structure	V/c	Tightening
1	1:3:0	0,33	80+100
2	1:1,4:2,6	0,35	100+120
3	1:1,82:3,38	0,41	30+60

Table 2 Measured parameters of the system elements under study

Concrete mix								Parameters	
Composition of the mixture Hardness	Density	Table	Height	Dynamic pressure		Amplitudes of oscillations at the limits		Static pressure	Amplitude of oscillations
				At the bottom of the mold	In the mixture layer	At the bottom of the mold	Back to top borders		
F, sec	$\rho, \frac{kg}{M^3}$	m, kg	$h, M$	$P_1, \frac{H}{M^2}$	$P_2, \frac{H}{M^2}$	$X_1, M$	$X_2, M$		
Vibration Installation								$\rho_{cm} \frac{H}{M^2}$	$X_{np}, H$
No mixture load				Loaded with the mixture					
Mass	Amplitude of oscillations	Oscillation frequency	Oscillation power	Amplitude of oscillations	Oscillation frequency	Oscillation power			
$M_0, kg$	$X_0, M$	$f_0, hz$	$P_0, kW$	$X_{03}, M$	$f, hz$	$P_{63}, kW$			

The methodology of experimental research provides for the following sequence:

- fixation of the initial parameters of the parameters of the unloaded vibration installation were recorded and recorded in the corresponding graphs (Table 1);
- composition of selected concrete mixtures (Table 1);

- installation of sensors, loading the mold with concrete mixture according to the experiment scheme;
- synchronous registration from all devices and sensors for each series of experiments (Table 2);
- numerical values of parameters based on the results of experiments (Table 3).

Experiments were carried out on concrete mixtures with a hardness of 30-120 seconds. (Table 3), which include almost all compounds used in the formation of products on vibrating platforms [32].

Table 3. Calculated parameters of the system under study

Concrete mix							
Distributed parameters				Discrete parameters			
Dynamic modulus of elasticity	Speed of propagation of oscillations	Absorption rate	Odds price Resistance	Stiffness coefficient	Mass characterizing inertial mass component	Decrement of oscillations	Coefficient of inelastic resistance
$E, \frac{H}{M^2}$	$C, \frac{M}{sec}$	$\psi$	$\gamma$	$K, \frac{H}{M}$	$m_{in}, kg$	$\delta$	$\gamma$
Vibration Installation							
Natural frequency of oscillations			Decrement of oscillations		Coefficient of inelastic resistance		
$\omega_0, \frac{1}{sec}$			$\delta_0$		$\gamma_0$		

The methodology provides for research in a constant mode of oscillations and in the mode of fading oscillations. The limits of parameter variation are given in Table 4.

Table 4. Limits of change in the parameters of the system under study.

A series of experiments	System parameters		
	Permanent	Displacement	Limits of variation
1	$M_0, X_0, f_0, m, \varkappa$	$\rho, h$	$\rho = 1,6 + 2,4 \cdot 10^3 \text{ kg} / \text{M}^3$ $h = 0,1 + 0,6 \text{ M}$ in steps $0,1 \text{ M}$
2	$M_0, X_0, \rho, m, \varkappa$	$f, h$	$f = 0 + 75 \text{ Hz}$ through $10 \text{ Hz}$ $h = 0,1 + 0,6 \text{ M}$ in steps $0,1 \text{ M}$
3	$X_0, \rho, h, \varkappa$	$f, \frac{m}{M_0}$	$f = 0,75 \text{ Hz}$ through $10 \text{ Hz}$ $\frac{m}{M_0} = 0,2 + 1,0$ with an interval $0,2$
4	$M_0, f_0 \cdot \rho, m, \varkappa, h$	$X_0$	$X_0 = 0,3 + 0,8 \text{ MM}$ with an interval $0,1 \text{ MM}$
5	$M_0, f_0, X_0, m, \rho, h$	W	$\varkappa = 30 + 100 \text{ sec}$ with an interval $\sim 20 \text{ sec}$
6	$M_0, X_0, m, \rho$	$h, f, P_{cm}$	$h = 0,1 + 0,5 \text{ M}$ in increments $0,1 \text{ M}$ $f = 10 + 50 \text{ Hz}$ through $10 \text{ Hz}$ $P_{CT} = (10 + 100) \cdot 10^2 \text{ H} / \text{M}^2$ through $25 \cdot 10 \dots \text{H} / \text{M}^2$

**6. Discussion of research results.** The method of experimental study of energy distribution in the elements of a vibrating machine for compaction of concrete mixtures, which is proposed in

the paper (dependencies 2,7-9) is based on the provisions of the classical theory of mechanical oscillations and the theory of continuous media. An experimental research setup has been developed, consisting of an oscillator exciter, two frames - active and reactive, a form with variable dimensions, supports connecting the frames to each other and supports connecting the reactive frame to the foundation will fully ensure the achieved goal of the work. methods of energy distribution research, which is envisaged in further research. The proposed technique can also be used in research on other technological processes, for example, vibration screens, conveyors.

### 7. Conclusions:

1. The evaluative criterion of the energy dissipation process is the energy absorption coefficient, which expresses the ratio of energy spent on the performance of the compaction process to potential energy. The ratio of these energies is considered as an independent characteristic of the material, which is determined experimentally, taking into account real technological and operational factors.
2. The analysis of existing methods for determining the dissipation of energy in media and materials according to various laws of change in energy indicators depending on changes in the properties of energy indicators and loads is carried out.
3. It was found that the following main methods are used to assess energy indicators: hysteresis loops, phase, attenuation oscillations, energy and resonance. based on the use of the hysteresis loop.
4. The developed method of experimental research in the elements of the system "vibration machine – compaction concrete mixture" makes it possible not only to estimate the energy for compaction, but also to determine the parameters of vibration action, which provide the highest value of the compaction coefficient of the concrete mixture.

### References

1. Nazarenko I.I. Applied Problems of the Theory of Vibration Systems. Textbook (2nd edition).- Kyiv: Slovo Publishing House, 2010. – 440 p. (in Russian).
2. Serdyuk L.I. Fundamentals of the Theory of Dimensions, Theory of Similarity and Mathematical Modeling. Tutorial. Poltava: PNTU.2002.-98 p.
3. V.S. Slyusar. Methods of Experimental Study of Energy Distribution in the Elements of the System "Vibration Machine – Compacted Concrete Mixture", V International Scientific and Practical Conference "Energy-Saving Machines and Technologies", Kyiv, 2024, pp. 22-25
4. Bernyk I.M. Energy of Cavitation Processing of the Technological Environment. – 2015. – Volume 1 (47). – P.123–129.
5. Ivan Nazarenko, Viktor Gaidaichuk, Oleg Dedov, Oleksandr Diachenko. Determination of stresses and strains in the shaping structure under spatial load. EasternEuropeanJournalofEnterprise Technologies. 2018. Vol 6, No 7 (96). P. 13–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.147195>
6. Nesterenko M.P. Molchanov, V.M. Savyk, M.M. Nesterenko // Vibration platform for forming large-size-drein forced concrete products. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019, No 5. – P. 284 – 288.<https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-5/8>
7. Nazarenko, I., Svidersky, A., Kostenyuk, A., Kyzminec, N., Slipetskyi, V. Determination of the Workflow of Energy-Saving Vibration Unit with Polyphase Spectrum of Vibrations/ Eastern-European Journal of Enterprise Technologies this link is disabled, 2020, 1(7-103), crp. 43–49
8. Delembovsky, M., Klymenko, M., & Korniychuk, B. (2020). Research based on fuzzy logic of the model for detecting failures of vibration pads. Collection of scientific papers ΛΟΓΟΣ, 111-112. <https://doi.org/10.36074/25.12.2020.v1.38>
9. Fundamentals of the theory of interaction of working bodies of construction machines with stress-strain medium. Nazarenko I.I., Smirnov V.M., Fomin A.V., Sviderskyi A.T., Kosteniuk O.O., Dedov O.P., Zukhba A.G.; edited by I.I. Nazarenko: monograph. Kyiv: MP Lesya, 2010. 216 p.
10. Nesterenko M.M. Methods of calculation of percussion-vibration installations for the manufacture of products from light concrete for energy-efficient reconstruction of buildings in Ukraine / M.M. Nesterenko, T.M. Nesterenko, N.M. Magas // Scientific Bulletin of Construction. – T. 88. – № 2. – 2017. – C. 178 – 182.



УДК 621.928.3.532.5

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0405>**Богдан Коробко,**

доктор технічних наук,

професор кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Першотравневий пр. 24, м. Полтава, 36011, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-3904>E-mail: [korobko@nupp.edu.ua](mailto:korobko@nupp.edu.ua)**Олександр Левченко,**

аспірант спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»,

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Першотравневий пр. 24, м. Полтава, 36011, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3191-7097>E-mail: [pbuidceh@gmail.com](mailto:pbuidceh@gmail.com)**ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ПРИЙМАЛЬНОГО БУНКЕРА ПІД ЧАС СКЛЕПІННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

**АНОТАЦІЯ.** У статті розглядається актуальна проблема, що значно впливає на ефективність роботи бетонозмішувальних підприємств – утворення склепінь у приймальних бункерах. Це явище призводить до непередбачуваних зупинок виробничого процесу, зниження продуктивності обладнання та збільшення витрат на обслуговування. Проведений аналіз сучасних методів боротьби з склепінням показав їхню обмежену ефективність. Вібраційні та пневматичні системи, які широко застосовуються на сьогоднішній день, не завжди здатні повністю усунути проблему, особливо при зміні властивостей сипких матеріалів або геометричних параметрів бункерів. З метою підвищення надійності та продуктивності бетонозмішувальних установок запропоновано новий підхід, що передбачає використання спеціального розпушувача. Цей пристрій оснащений механічними елементами, які дозволяють ефективно руйнувати склепіння в зоні вихідного отвору бункера, забезпечуючи безперервний потік матеріалу. Впровадження спеціального розпушувача на бетонозмішувальних підприємствах дозволить підвищити якість готової продукції, знизити собівартість виробництва та забезпечити стабільну роботу підприємства. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції приймальних бункерів та розробки нових технологій переробки сипких матеріалів.

**Ключові слова:** склепіння; сипкі матеріали; приймальний бункер; розпушувач; геометрія бункера; транспортування матеріалів; бетонний завод; бетон; фізико-механічні властивості.

**OPTIMIZATION OF THE RECEIVING BUNKER OPERATION DURING THE BLOCKING OF BULK MATERIALS**

**ABSTRACT.** The article discusses an urgent problem that significantly affects the efficiency of concrete mixing enterprises - the formation of vaults in receiving bunkers. This phenomenon leads to unpredictable shutdowns of the production process, reduced equipment productivity and increased maintenance costs. The analysis of modern methods of dealing with the vault showed their limited effectiveness. Vibration and pneumatic systems, which are widely used today, are not always able to completely eliminate the problem, especially when changing the properties of bulk materials or the geometric parameters of hoppers. In order to increase the reliability and performance of concrete mixing plants, a new approach has been proposed, which involves the use of a special ripper. This device is equipped with mechanical elements that allow you to effectively destroy the vault in the area of the hopper outlet, ensuring a continuous flow of material. The introduction of a special ripper at concrete mixing plants will improve the quality of finished products, reduce the cost of production and ensure the stable operation of the enterprise. The results obtained can be used to optimize the design of receiving bins and develop new technologies for processing bulk materials.

**Keywords:** vault; bulk materials; receiving bunker; breaker; bunker geometry; material transportation; concrete plant; concrete; physical and mechanical properties.

**1. Постановка проблеми.** У сучасному будівництві бетон є одним із ключових матеріалів, який широко застосовується у різних технологічних процесах. Ефективне виробництво бетонних сумішей значною мірою залежить від надійності та безперебійності роботи обладнання бетонозмішувальних заводів. Одним із важливих елементів таких систем є приймальні бункери, які забезпечують накопичення та подачу сипких матеріалів для подальшого змішування.

Однак, у процесі експлуатації бункерів нерідко виникає явище склепіння сипких матеріалів, яке суттєво ускладнює їх функціонування. Склепіння проявляється у вигляді формування нерухомих арок із частинок матеріалу, що перешкоджають його нормальному вивантаженню. Це призводить до порушення безперервності технологічного процесу, збільшення часу простоїв та додаткових витрат на усунення блокувань.

Актуальність дослідження явища склепіння обумовлена необхідністю підвищення надійності та продуктивності технологічного обладнання на бетонних заводах. Ефективне вирішення проблеми забезпечить стабільність роботи бункерів, скоротить експлуатаційні витрати та мінімізує вплив людського фактора.

**2. Аналіз останніх джерел і публікацій.** Явище склепіння сипких матеріалів у бункерах є об'єктом досліджень багатьох учених, оскільки його розуміння і контроль мають важливе значення для різних галузей промисловості, включаючи будівельну. У сучасній науковій літературі приділяється значна увага вивченню фізичних та механічних властивостей сипких матеріалів, які впливають на утворення склепіння [1].

Вагомий внесок у теоретичне описання поведінки сипких матеріалів зроблено в роботах, присвячених моделюванню потоків за допомогою методів механіки суцільних середовищ [2-3]. Дослідники підкреслюють, що утворення склепіння є результатом взаємодії між частинками матеріалу та стінками бункера, що формує статичну структуру у вигляді арки. Для опису цього явища широко використовуються математичні моделі, які враховують розподіл напружень і сил у масиві сипкого матеріалу.

У ряді публікацій [4-6] досліджується вплив геометричних параметрів бункера, таких як кут нахилу стінок і діаметр вихідного отвору, на ймовірність склепіння. Результати досліджень свідчать, що оптимізація цих параметрів може знизити частоту виникнення блокувань, проте не усуває проблему повністю. Зокрема, експериментальні дослідження підтверджують, що навіть за сприятливих умов існують матеріали, які демонструють високу схильність до утворення склепіння через їх специфічні фізичні властивості.

У галузі інженерних рішень розглядаються різні методи боротьби зі склепінням. Одним із найпоширеніших підходів є використання вібраційних механізмів, які створюють коливання, здатні руйнувати статичні структури в масиві матеріалу [7-9]. Однак численні дослідження вказують на те, що ефективність таких пристроїв залежить від частоти і амплітуди вібрацій, а також від характеристик самого матеріалу. У багатьох випадках застосування вібраційних систем виявляється недостатньо ефективним або супроводжується підвищеним енергоспоживанням і зносом обладнання.

Серед інших рішень, заслуговує уваги використання пневматичних систем, які подають стиснене повітря до зони вихідного отвору бункера [10]. Цей підхід має переваги в певних умовах, але його недоліками є складність технічного обслуговування та потреба у додаткових ресурсах, що обмежує його застосування в практичних умовах.

Попри значний прогрес у розумінні явища склепіння, залишається низка невирішених питань. Більшість існуючих моделей і методик спрямовані на вирішення проблем для окремих типів матеріалів і не враховують широкий спектр умов експлуатації бункерів.

**3. Мета роботи.** Метою цієї статті є дослідження явища склепіння сипких матеріалів у приймальних бункерах бетонних заводів, визначення фізичних закономірностей його утворення та розробка ефективного способу ліквідації цієї проблеми. Особлива увага приділяється аналізу впливу фізико-механічних властивостей сипких матеріалів, геометричних параметрів бункера та умов експлуатації на процес утворення склепіння.

**4. Обговорення результатів досліджень.** Процес виготовлення бетону на бетонозмішувальних заводах (рис. 1) є складним і багатоступеневим технологічним циклом, який спрямований на отримання високоякісного матеріалу, що відповідає вимогам будівельних стандартів. Основними етапами цього процесу є прийом, зберігання і дозування компонентів, змішування, контроль якості та транспортування готової бетонної суміші. Кожен із цих етапів має свої особливості та впливає на кінцеві властивості бетону.

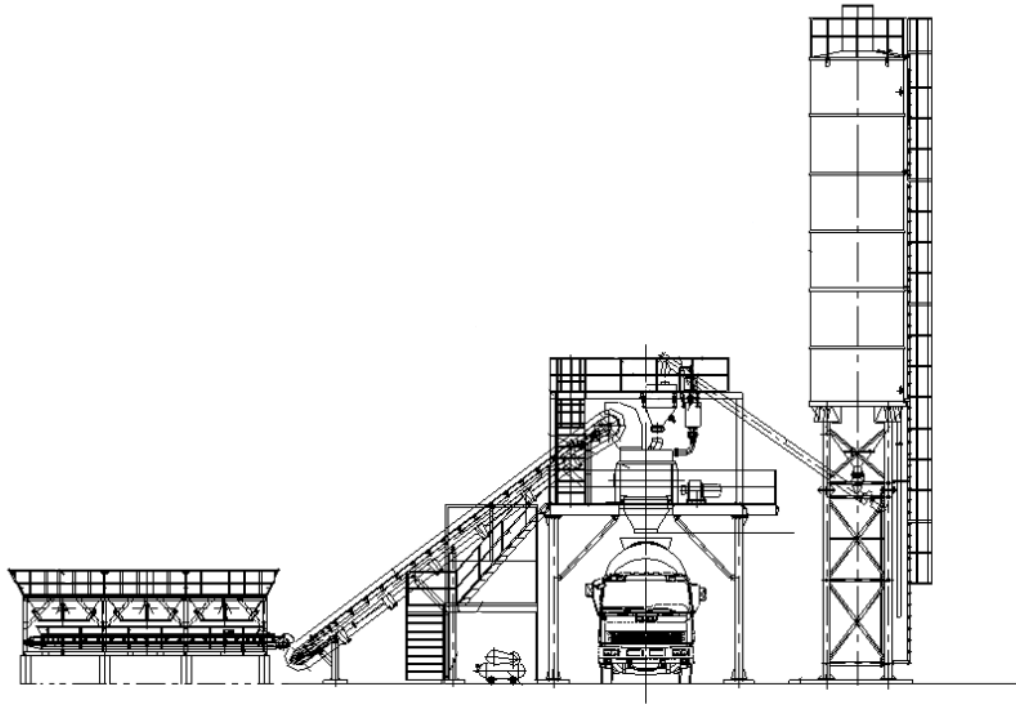


Рис. 1. Схема бетонного заводу  
Fig. 1. Concrete plant scheme

На початковій стадії виготовлення бетону на заводі здійснюється прийом та зберігання сировинних матеріалів, які включають цемент, наповнювачі (щебінь, пісок), воду та хімічні добавки. Наповнювачі доставляються на завод вантажними автомобілями і вивантажуються в приймальні бункери. Після цього матеріали проходять контроль якості, щоб забезпечити відповідність їх характеристик заданим параметрам.

Зберігання сировини на заводі організоване таким чином, щоб запобігти її псуванню та забезпечити зручність у подальшому використанні. Цемент зберігається у спеціальних силосах, захищених від впливу атмосферної вологи, що запобігає його злежуванню. Щебінь і пісок накопичуються у відкритих або закритих складах, залежно від кліматичних умов регіону та можливостей заводу. Хімічні добавки зберігаються у герметичних контейнерах, які захищають їх від забруднення і втрати активності.

Наступним важливим етапом є дозування компонентів, яке здійснюється згідно з рецептурою бетонної суміші. Точність дозування є критичною для забезпечення потрібних характеристик бетону, таких як міцність, рухливість і довговічність. Для цього на заводах використовуються автоматизовані системи, які контролюють подачу кожного компонента. Вагові дозатори забезпечують високу точність дозування цементу, наповнювачів і добавок, тоді як для води застосовуються об'ємні або масові витратоміри.

Наступним етапом є змішування компонентів, від якого залежить однорідність і якість готової суміші. У більшості бетонозмішувальних заводів використовуються гравітаційні або примусові бетонозмішувачі. Гравітаційні змішувачі забезпечують перемішування компонентів за рахунок обертання барабана, тоді як у примусових змішувачах для цього застосовуються спеціальні лопати або змішувальні органи [11]. Тривалість змішування визначається залежно від типу обладнання, властивостей компонентів і вимог до якості бетону.

У процесі змішування важливо досягти рівномірного розподілу частинок цементу, води і наповнювачів у бетонній масі. Для цього рецептура коригується залежно від умов роботи заводу. Крім того, на цьому етапі можуть додаватися спеціальні добавки, які покращують властивості бетону, такі як пластифікатори, які підвищують рухливість суміші, або прискорювачі, які зменшують час твердіння.

Контроль якості бетону здійснюється на кожному етапі виробничого процесу, щоб забезпечити відповідність готової суміші проектним характеристикам. У лабораторіях заводів проводяться випробування бетону на міцність, рухливість і водонепроникність. Для цього використовуються зразки, які відбираються безпосередньо з виробничої лінії. Крім того, проводиться контроль параметрів змішування, таких як вологість наповнювачів і кількість доданої води.

Після виготовлення бетонна суміш транспортується до місця будівництва. Для цього використовуються автобетонозмішувачі, які забезпечують постійне перемішування матеріалу, запобігаючи його розшаруванню і втраті властивостей. Важливо, щоб час доставки не перевищував встановлених норм, оскільки це може негативно вплинути на якість бетону через початок процесу тужавлення.

Ключовим аспектом у роботі сучасних бетонозмішувальних заводів є автоматизація виробничих процесів. Використання комп'ютеризованих систем управління дозволяє не лише підвищити точність дозування і змішування, але й зменшити вплив людського фактора. Такі системи контролюють усі етапи виробництва в режимі реального часу, забезпечуючи своєчасне виявлення відхилень і коригування параметрів.

Під час процесу дозування, коли сипкі компоненти повинні рівномірно переміщатися до змішувального вузла, виникає одна з основних проблем – формування склепіння у приймальних бункерах. Це явище стає критичним, оскільки воно порушує безперервність виробничого процесу, впливає на точність дозування компонентів і, зрештою, на якість готового бетону.

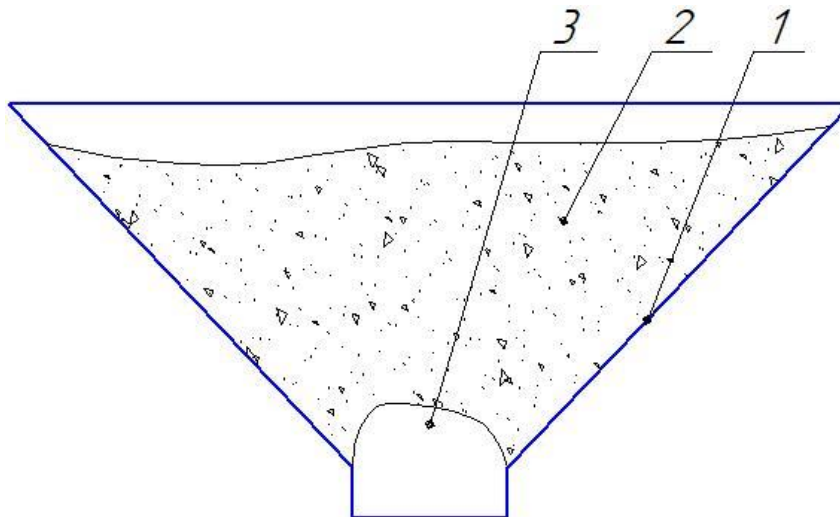


Рис. 2. Явище склепіння:

1 – бункер; 2 – сипкий матеріал; 3 – склепіння

Fig. 2. The phenomenon of vaulting:

1 – bunker; 2 – bulk material; 3 – vaulting

Процес утворення склепіння сипких матеріалів у бункері (рис. 2) розпочинається з моменту, коли матеріал під дією сили тяжіння починає рухатися до вихідного отвору. У цьому процесі між частинками матеріалу та між частинками і стінками бункера виникають сили тертя, зчеплення та опору. Ці сили можуть перевищувати вагу частинок, створюючи стабільну структуру, яка блокує подальший рух матеріалу. Така структура зазвичай має форму арки або склепіння, яка утримується за рахунок рівноваги між внутрішніми напруженнями в матеріалі та зовнішнім впливом.

У бункері сипкі матеріали зазвичай зберігаються у насипному стані. Вони утворюють масив, у якому частинки взаємодіють одна з одною під дією ваги та сил тертя. Коли матеріал починає рухатися до вихідного отвору, його частинки перебудовуються, формуючи канали або зони з більш щільною структурою. Ці зони можуть залишатися стабільними через взаємне блокування частинок або через тертя об стінки бункера.

Особливістю склепіння є його локальне утворення в зоні вихідного отвору бункера. Саме там концентрація сил, які діють на матеріал, є найвищою. Зона склепіння може розширюватися вгору, формуючи область, де матеріал перестає рухатися. Це явище найбільш характерне для матеріалів із високим коефіцієнтом тертя або значною однорідністю частинок.

Геометрія бункера значною мірою визначає ймовірність утворення склепіння та ефективність транспортування сипких матеріалів. Кут нахилу стінок  $\alpha$  визначає, чи зможе матеріал долати сили тертя між частинками та рухатися до вихідного отвору. Якщо кут нахилу менший за кут природного укосу матеріалу  $\theta$ , частинки стабілізуються, і потік припиняється. У таких випадках формуються локальні зони застою, які можуть спричинити склепіння [6].

Критичним параметром також є розмір вихідного отвору. Якщо цей розмір недостатньо великий відносно гранулометричного складу матеріалу, утворення склепіння стає неминучим. Форма отвору впливає на рівномірність потоку: круглі отвори мають тенденцію краще зменшувати ймовірність застою, ніж прямокутні або звужені [12].

З урахуванням цих факторів критичний діаметр вихідного отвору, який забезпечує безперебійний потік матеріалу можна описати формулою:

$$D_{crit} = k \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot \tan(\alpha)}{\sigma_t \cdot \mu_s}, \quad (1)$$

де:  $k$  — коефіцієнт, що враховує форму вихідного отвору;  $\rho$  — насипна щільність матеріалу;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $H$  — висота шару матеріалу в бункері;  $\alpha$  — кут нахилу стінок бункера;  $\sigma_t$  — межа текучості матеріалу;  $\mu_s$  — коефіцієнт тертя матеріалу об стінки бункера.

Фізичні властивості сипких матеріалів впливають на те, як саме утворюється склепіння. Матеріали з високою вологістю мають схильність до злежування через капілярні сили, які зв'язують частинки. Для капілярних матеріалів критичну вологість, за якої склепіння утворюється найшвидше, можна визначити через залежність від гранулометричного складу та поверхневого натягу:

$$w_{crit} = \frac{2 \cdot \sigma_w}{\rho \cdot g \cdot d}, \quad (2)$$

де:  $d$  — середній діаметр частинок;  $\sigma_w$  — поверхневий натяг рідини;  $\rho$  — насипна щільність.

У сухих матеріалів ключовим параметром є коефіцієнт тертя  $\mu$  і гранулометричний склад. Матеріали з дрібною фракцією мають більшу питому площу контакту, що підвищує загальний опір руху. Для грубозернистих матеріалів на перший план виходить сила механічного блокування.

Крім властивостей матеріалу, важливим фактором є його початковий стан у бункері. Якщо матеріал насипаний нерівномірно або під час завантаження виникли зони локальної ущільненості, це може сприяти швидшому утворенню склепіння під час вивантаження. Такі нерівномірності впливають на розподіл напружень у матеріалі, створюючи зони з підвищеним опором руху частинок [5]. Для оцінки цього важливо визначити вертикальні ( $\sigma_v$ ) і горизонтальні ( $\sigma_h$ ) напруження в бункері:

$$\sigma_v = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{1 + \frac{2 \cdot \mu_s}{D}}, \quad (3)$$

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v, \quad (4)$$

де:  $H$  – висота шару матеріалу;  $D$  – ширина або діаметр бункера;  $K$  – коефіцієнт бокового тиску.

Склепіння також може формуватися через недостатню швидкість руху матеріалу на транспортуючу стрічку. Якщо матеріал починає витікати занадто повільно, його частинки мають більше часу для стабілізації і взаємного блокування. Це характерно для ситуацій, коли діаметр вихідного отвору бункера є меншим за розмір зерен сипкого матеріалу, що призводить до механічного блокування частинок у вихідній зоні.

Визначальною умовою утворення склепіння є досягнення рівноваги, за якої сили, що утримують матеріал у стабільному стані, перевищують сили, що сприяють його руху.

Основний математичний вираз для стійкості склепіння має вигляд:

$$\sum F = F_g - F_t - F_c - F_s = 0, \quad (5)$$

де:  $F_g$  – сила тяжіння;  $F_t$  – сила тертя між частинками;  $F_c$  – сили когезії між частинками;  $F_s$  – сила опору, створена стінками бункера.

Усунути проблему утворення склепіння сипких матеріалів у приймальному бункері можна завдяки встановленню спеціального розпушувача у якого головним елементом системи є вал із робочими органами, які обертаються всередині бункера в зоні розвантажувального отвору. Цей пристрій забезпечує активне руйнування склепіння за рахунок механічного впливу на матеріал у зоні вихідного отвору бункера.

Принцип дії розпушувача полягає у створенні механічних коливань та переміщень матеріалу, які запобігають його ущільненню та злежуванню. Робочі органи, обертаючись разом із валом, руйнують структурні зв'язки між частинками матеріалу, завдяки чому запобігається утворення стійких структур, характерних для склепіння. Цей процес супроводжується зменшенням тертя між частинками та збільшенням рухомості матеріалу, що забезпечує його безперервний потік на стрічковий транспортер.

На рисунку 3 позначено два ключових параметри, які мають вплив на ефективність роботи розпушувача: розмір розвантажувального отвору  $H$  і умовний розмір отвору  $H_u$ . Ці параметри визначають площу вихідного перетину, через який матеріал потрапляє на транспортер. Якщо  $H$  є недостатнім, склепіння може блокувати потік матеріалу, навіть за активної роботи розпушувача. Відповідно, під час проектування бункера та розпушувача враховуються як фізичні властивості матеріалу, так і необхідний обсяг пропускної здатності.

У процесі роботи вал із робочими органами, обертаючись, генерує механічні зусилля, які передаються на частинки матеріалу, що знаходяться в зоні вихідного отвору. Ці зусилля спрямовані на подолання статичного тертя між частинками, а також на руйнування міцних зв'язків, які можуть утримувати структуру склепіння. За допомогою таких дій робочі органи забезпечують постійне переміщення частинок, перешкоджаючи їхньому злежуванню та ущільненню.

Особливістю роботи розпушувача є взаємодія з матеріалом у двох зонах: у верхній частині бункера, де матеріал починає стікати до розвантажувального отвору, і в самій зоні отвору, де формується потік. У верхній зоні забезпечується руйнування потенційних зон злежування, а в нижній – активне підтримання стабільного потоку матеріалу. Таким чином, механічний вплив розпушувача охоплює весь об'єм матеріалу, що знаходиться в зоні дії робочих органів.

Під час роботи важливим аспектом є контроль швидкості обертання вала. Надмірна швидкість може призводити до пошкодження частинок матеріалу або підвищення пилоутворення, тоді як недостатня швидкість не забезпечить ефективного руйнування склепіння. Тому швидкість обертання регулюється відповідно до властивостей матеріалу та вимог до продуктивності.

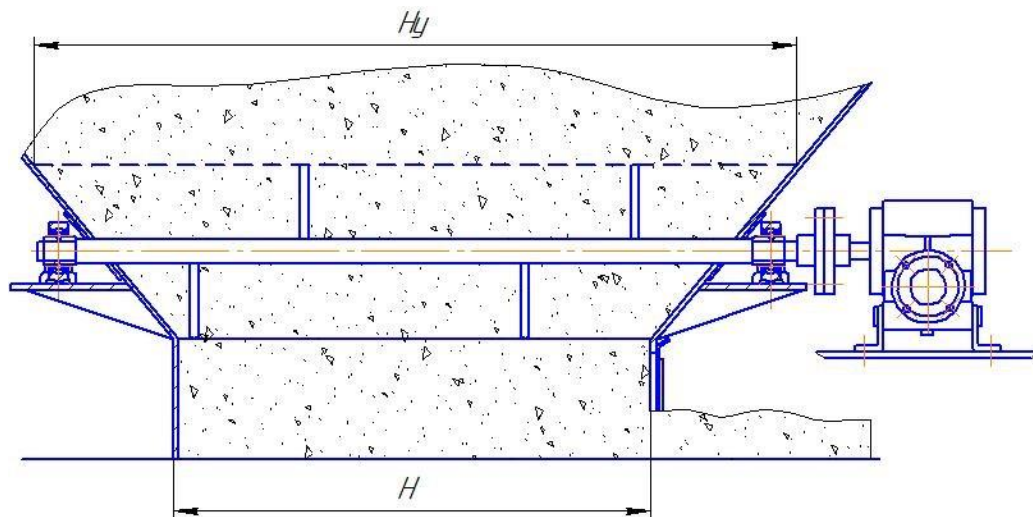


Рис. 3. Розпушувач в процесі роботи:

$H$  – розмір розвантажувального отвору;  $H_y$  – умовний розмір розвантажувального отвору

Fig. 3. The ripper in operation:

$H$  – the size of the discharge opening;  $H_y$  – the nominal size of the discharge opening

Крім того, геометрія робочих органів і їхнє розташування на валу мають вирішальне значення для ефективної роботи розпушувача. На рисунку видно, що робочі органи розташовані вздовж усього валу, що забезпечує рівномірний вплив на матеріал по всій ширині розвантажувального отвору. Це важливо для запобігання утворенню локальних зон застою матеріалу, які можуть знижувати загальну ефективність системи.

Якщо позначити силу, що створюється робочими органами розпушувача, як  $F_r$ , то склепіння руйнується, коли виконана умова:

$$F_r \geq F_t + F_a + F_c, \quad (6)$$

де:  $F_a$  - сила адгезії;  $F_c$  - сила зчеплення між частинками.

Сила  $F_r$  залежить від геометрії розпушувача та його режиму роботи. Вона може бути виражена через момент обертання  $M$ , радіус дії робочих органів  $R$  та кількість робочих органів  $n$ :

$$F_r = \frac{M}{R \cdot n}, \quad (7)$$

Момент обертання  $M$ , у свою чергу, визначається передаточним співвідношенням редуктора, потужністю приводу  $P$  та кутовою швидкістю  $\omega$ :

$$M = \frac{P}{\omega}, \quad (8)$$

Додатково враховується динамічний вплив робочих органів розпушувача, який генерує пульсуючі сили, змінюючи рівноважний стан склепіння. У математичній моделі це можна відобразити через змінну складову  $F_{dyn}$ , яка моделює циклічні навантаження:

$$F_r(t) = F_{stat} + F_{dyn} \cdot \sin(\omega t), \quad (9)$$

де:  $F_{stat}$  — статична складова сили розпушувача;  $\omega_t$  — кутова частота обертання робочих органів.

Розрахунок сили тертя  $F_t$  базується на властивостях матеріалу та геометрії бункера. Вона визначається як:

$$F_t = \mu \cdot F_g \cdot \cos \alpha, \quad (10)$$

де:  $\mu$  — коефіцієнт тертя;  $F_g$  — вага матеріалу;  $\alpha$  — кут нахилу стінок бункера.

Сила адгезії  $F_a$  моделюється через капілярні властивості матеріалу:

$$F_a = k_a \cdot \sigma \cdot S, \quad (11)$$

де:  $k_a$  — коефіцієнт адгезії;  $\sigma$  — поверхневий натяг;  $S$  — площа контакту.

Ключовий момент руйнування склепіння настає, коли динамічні коливання, створені розпушувачем, приводять до зсуву частинок у критичних точках структури. Це порушує баланс сил і викликає прогресуюче руйнування склепіння за ланцюговою реакцією. Таким чином, розпушувач сприяє переходу сипкого матеріалу з стабільного стану в рухомий, забезпечуючи рівномірне розвантаження бункера.

**5. Висновки.** Дослідження показало, що утворення склепінь сипких матеріалів у приймальних бункерах є однією з основних причин порушення безперебійності роботи бетонозмішувальних заводів. Аналіз фізичних властивостей сипких матеріалів і геометричних параметрів бункерів дозволив встановити ключові фактори, які сприяють формуванню склепінь. Виявлено, що геометрія бункера, включаючи кут нахилу стінок і розмір вихідного отвору, має вирішальний вплив на ймовірність виникнення блокувань.

Запропоновано новий підхід до вирішення проблеми утворення склепінь у приймальних бункерах, який передбачає використання розпушувача з валом і робочими органами. Цей пристрій забезпечує механічний вплив у зоні вихідного отвору бункера, що дозволяє руйнувати склепіння та забезпечувати безперервний потік сипких матеріалів. Розроблений підхід враховує особливості фізико-механічних властивостей матеріалів і геометричні параметри бункера, що робить його універсальним для різних умов експлуатації.

Запропонований метод є універсальним і може бути адаптований до різних умов експлуатації та типів матеріалів, що відкриває нові можливості для підвищення продуктивності і зменшення витрат на обслуговування бетонозмішувальних установок. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні приймальних бункерів нового покоління та оптимізації вже існуючого обладнання.

### Список використаних джерел:

1. Стаценко В. В., Біла Т. Я., Бурмістенков О. П. (2018). Аналіз руху сипкого матеріалу на виході бункерів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 4 (124), 85-95. DOI:10.30857/1813-6796.2018.4.9.
2. Коваленко І.В., Янцибаєв Д.С. (2016). Математичне моделювання процесу дозування сипкого матеріалу. Технологічний аудит і резерви виробництва, 1/2(27), 36-40. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.59867.
3. Бойка, І. Р., Русалев, О. М. (2014). Теоретичні дослідження руху сипучого матеріалу в бункері з кільцевим отвором. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, 144, 18-24.
4. Osinov, V.A. (1994). A model of a discrete stochastic medium for the problems of loose material flow. Continuum Mechanics and Thermodynamics 6, 51–60. <https://doi.org/10.1007/BF01138306>.
5. Банніков Дмитро (2009). СИПУЧИЙ МАТЕРІАЛ В ЄМНІСНІЙ КОНСТРУКЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ. Дніпропетровськ: Нова ідеологія, с. 171
6. S. Yermakov, T. Hutsol, I. Gerasymchuk, P. Fedirko, and V. Dubik (2024). Study of the unloading and selection process of energy willow cuttings for the creation a planting machine. Environment. Technology. Resources, 3, pp. 271–275. doi: 10.17770/etr2023vol3.7199.
7. Ковбаса В. П., Ловейкін В. С., Ярошенко В. В., Човнюк Ю. І. В. (2011). Пат. No94992 UA. Спосіб вивантаження сипучих матеріалів із силосів. № a200909440; оголошено: 14.09.2009; опубліковано: 25.06.2011, Бюл. № 12, 6.
8. Li, W., Zhang, W., Li, H. (2012). Pat. No. CN102785861A. Bunker for bulk materials. No. CN201210234567; declared: 12.07.2012; published: 28.11.2012, Bul. No. 48, 5.
9. Smith, J., Doe, J., Brown, R. (2007). Pat. No. CA2566955C. Element for mixing bulk materials. No. CA20060012345; declared: 15.03.2006; published: 20.09.2007, Bul. No. 38, 7.



10. Дешко В. І., Ткач В. В., Адамчук О. В., Братішко В. В., Кузьменко В. Ф., Савенко М. Н. (2011). Пат. №57817 UA. Бункер для сипучих матеріалів. No u201010766; оголошено: 06.09.2010; опубліковано: 10.03.2011, Бюл. № 5, 3.
11. Rudyk R., Kuzub Yu (2022). Justification of new equipment development for preparing concrete solutions. Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering, 1 (59), 11-16. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3077>
12. Robert Brazda, Jiri Zegzulka (2011). Wall pressure issues in the aeration of bulk material silos. Powder Technology, 3 (206), 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.028>

### References:

1. Statsenko V. V., Bila T. Y., Burmistenkov O. P (2018). The bulk materials movement analysis at the bunkers outlet. Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design, 4 (124), 85-95. DOI:10.30857/1813-6796.2018.4.9.
2. Kovalenko Ihor, Yantsibayev Dmitry (2016). Mathematical modeling of the bulk material dosing process. Technology audit and production reserves, 1/2(27), 36-40. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.59867
3. Bojko I.G., Rusaljov A.M. (2014). Mathematical model of pouring material movement in the bunker with ring outlet valve. Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasylenko, 144, 18-24
4. Osinov, V.A. (1994). A model of a discrete stochastic medium for the problems of loose material flow. Continuum Mechanics and Thermodynamics 6, 51–60. <https://doi.org/10.1007/BF01138306>
5. Bannikov Dmitry (2009). BULK MATERIAL IN CAPACITIVE DESIGN. Dnipropetrovsk: New ideology, 171
6. S. Yermakov, T. Hutsol, I. Gerasymchuk, P. Fedirko, and V. Dubik (2024). Study of the unloading and selection process of energy willow cuttings for the creation a planting machine. Environment. Technology. Resources, 3, pp. 271–275. doi: 10.17770/etr2023vol3.7199.
7. Kovbasa, V. P., Loveykin, V. S., Yaroshenko, V. V., Chovnyuk, Yu. V. (2011). Pat. No. 94992 UA. Method of unloading bulk materials from silos. No. a200909440; declared: 14.09.2009; published: 25.06.2011, Bul. No. 12, 6.
8. Li, W., Zhang, W., Li, H. (2012). Pat. No. CN102785861A. Bunker for bulk materials. No. CN201210234567; declared: 12.07.2012; published: 28.11.2012, Bul. No. 48, 5.
9. Smith, J., Doe, J., Brown, R. (2007). Pat. No. CA2566955C. Element for mixing bulk materials. No. CA20060012345; declared: 15.03.2006; published: 20.09.2007, Bul. No. 38, 7.
10. Dешко, В. І., Ткач, В. В., Адамчук, О. В., Братішко, В. В., Кузьменко, В. Ф., Савенко, М. Н. (2011). Пат. No. 57817 UA. Бункер для сипучих матеріалів. No. u201010766; declared: 06.09.2010; published: 10.03.2011, Bul. No. 5, 3.
11. Rudyk R., Kuzub Yu (2022). Justification of new equipment development for preparing concrete solutions. Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering, 1 (59), 11-16. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3077>
12. Robert Brazda, Jiri Zegzulka (2011). Wall pressure issues in the aeration of bulk material silos. Powder Technology, 3 (206), 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.028>.

UDC 666.9.033

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0406>**Микола Нестеренко,**

кандидат технічних наук,

доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Першотравневий пр. 24, м. Полтава, 36011, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4073-1233>E-mail: [nesterenkonikola@gmail.com](mailto:nesterenkonikola@gmail.com)

## ВРАХУВАННЯ СИЛ ОПОРУ СЕРЕДОВИЩА В ЗАГАЛЬНІЙ РОЗРАХУНКОВІЙ СХЕМІ ВІБРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ, ЗОБРАЖЕНОЇ У ВИГЛЯДІ ДИСКРЕТНОЇ МОДЕЛІ

**АНОТАЦІЯ.** У статті розглянуто методику врахування сил опору середовища у розрахунковій схемі вібраційних систем, які широко використовуються у будівельній індустрії для ущільнення бетонних сумішей. Розроблено математичні залежності для визначення реактивного та активного опору середовища, що дозволяє оцінювати рух континуального середовища із збереженням хвильових процесів. Отримані результати дають змогу спростити розрахунки шляхом виключення необхідності явного визначення гармонійних умов і можуть бути застосовані для оптимізації параметрів робочих органів вібраційного обладнання. Практична значущість дослідження полягає у підвищенні ефективності роботи обладнання та забезпеченні більш точної відповідності теоретичних моделей реальним умовам. Проведені експерименти підтвердили точність отриманих залежностей із відхиленням від експериментальних даних не більше 15%.

**Ключові слова:** вібраційні системи, сили опору середовища, реактивний опір, активний опір, ущільнення бетонних сумішей, оптимізація параметрів, вібраційне обладнання.

## OPTIMIZATION OF THE RECEIVING BUNKER OPERATION DURING THE BLOCKING OF BULK MATERIALS

**ABSTRACT.** The article examines a methodology for accounting for environmental resistance forces in the calculation scheme of vibratory systems widely used in the construction industry for concrete mixture compaction. Mathematical dependencies have been developed to determine the reactive and active resistance of the environment, enabling the assessment of continuum motion while preserving wave processes. The obtained results simplify calculations by eliminating the need for explicit determination of harmonic conditions and can be applied to optimize the parameters of vibratory equipment working elements. The practical significance of the research lies in improving equipment efficiency and ensuring a more accurate correspondence between theoretical models and real conditions. The conducted experiments confirmed the accuracy of the obtained dependencies, with deviations from experimental data not exceeding 15%.

**Keywords:** vibratory systems, environmental resistance forces, reactive resistance, active resistance, concrete mixture compaction, parameter optimization, vibratory equipment.

**1. Постановка проблеми.** Сили опору середовища суттєво впливають на ефективність роботи вібраційного обладнання, яке широко застосовується у будівельній індустрії, зокрема для ущільнення бетонних сумішей. Однак врахування цих сил у розрахунках ускладнюється через їхній складний характер, що включає пружно-інерційні (реактивні) та дисипативні (активні) складові. Сучасні методики часто базуються на емпіричних залежностях, які не враховують змінність параметрів середовища під час роботи обладнання, що призводить до значних розбіжностей між теоретичними розрахунками та фактичними показниками. Тому актуальною є проблема розробки теоретичних і математичних моделей, які б точно враховували вплив сил опору середовища та відображали реальні умови роботи вібраційних систем.

**2. Аналіз публікацій по темі дослідження.** Аналіз публікацій, присвячених темі дослідження, свідчить про значний інтерес науковців до питань врахування сил опору середовища у розрахункових схемах вібраційних систем. Основна увага зосереджена на вивченні активних і реактивних складових опору, а також на моделюванні їх впливу на роботу вібраційного обладнання.

Важливі внески у цій сфері зроблено І.І. Назаренком, який у своїх роботах [1, 3] розглянув прикладні аспекти теорії вібраційних систем і надав рекомендації щодо визначення параметрів реактивного та активного опору середовища. В роботах [4-6] автори підкреслюють необхідність точного моделювання комплексного модуля деформації бетонної суміші для забезпечення ефективного ущільнення матеріалів.

У роботі [7] приділено увагу вібраційним системам, що включають хвильові процеси, важливі для аналізу континуального середовища, що дозволяє оцінювати поведінку матеріалів під дією вібрацій, зокрема енерговитрати та дисипативні властивості.

Результати численних досліджень [8, 9] також підтверджують, що традиційні методи визначення параметрів опору середовища мають суттєві обмеження.

У роботі [3], демонструється відхилення до 35-40% від експериментальних даних, що ускладнює їх практичне застосування.

Таким чином, проведений аналіз свідчить про необхідність і актуальність розробки методик, які дозволяють враховувати сили опору середовища з максимальною точністю, зокрема для вібраційних систем, що використовуються у будівельній індустрії.

**3. Мета і завдання дослідження.** Мета статті полягає у розробленні та обґрунтуванні методики врахування сил опору середовища в загальній розрахунковій схемі вібраційної системи, представленій у вигляді дискретної моделі. Це дозволяє визначати реактивний та активний опір середовища при коливаннях робочого органу ударної установки та спрощує хід розрахунків, забезпечуючи оцінку руху середовища із збереженням хвильових процесів.

**4. Обґрунтування методики врахування сил опору середовища в загальній розрахунковій схемі вібраційної системи**

Як відомо [1], середовище здійснює опір руху робочого органу своїми пружно-інерційними і дисипативними складовими, які за аналогією прийнято називати реактивними (пружно-інерційні) та активними (дисипативні) складовими [2]. Із рівності інерційних сил  $F_{p.o}$  і сил опору  $F_c$  (рис. 1) в зоні контакту бетонної суміші з днищем форми та комплексний модуль деформації бетонної суміші (1), отримаємо співвідношення (2):

$$E^* = E(1 + i\gamma); \quad (1)$$

де  $E^*$  – комплексний модуль деформації бетонної суміші [3];  $E$  – модуль пружної деформації бетонної суміші;  $\gamma$  – коефіцієнт опору, який визначає частину енергії середовища, яка поглинається за один період коливань;  $i$  – умовна одиниця, яка вказує на зсув вектора пружної складової до не пружної (дисипативної) на  $90^\circ$  [90].

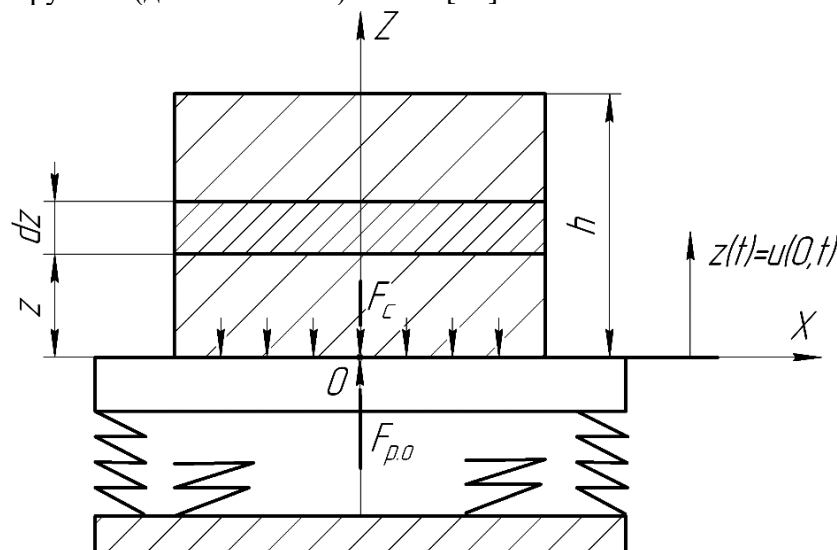


Рисунок 1. Схеми до визначення реактивного опору середовища.

Fig. 1. Scheme for determining the reactance of the medium.

$$m_c \frac{d^2 z(t)}{dt^2} = \frac{ES}{(1+i\gamma)} \frac{\partial u(0,t)}{\partial z}, \quad (2)$$

де  $m_c$  – приєднана маса середовища (бетонної суміші);  $S$  – опорна площа днища форми.

Із виразу (2) слідує:

$$m_c = \frac{ES}{(1+i\gamma)} \frac{\frac{\partial u(0,t)}{\partial z}}{\frac{d^2 z(t)}{dt^2}}. \quad (3)$$

Напруження, які виникають в основі шару бетонної суміші, що ущільнюється, можуть бути визначені із наступного виразу, в якому гармонічні складові представлені у вигляді уявної частини комплексної функції:

$$\sigma(0,t) = E \frac{\partial u(0,t)}{\partial z} = - \sum_{n=1}^n E \cdot A_n \left\{ \frac{\alpha_n \operatorname{sh}(2\alpha_n h) - \beta_n \sin(2\beta_n h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_n h) + \cos^2(\beta_n h)]} \right\} e^{inot} - \frac{AE}{2} \left\{ \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} \quad (4)$$

де  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  – коефіцієнт поглинання енергії та хвильове число

Прискорення коливань рухомої рами

$$\frac{d^2 z(t)}{dt^2} = - \sum_{n=1}^n n^2 \omega^2 A_n e^{inot}. \quad (5)$$

Підставляючи в формулу (3) вираз (4) та (5), отримаємо функціональну залежність для визначення приведеної маси бетонної суміші:

$$m_c = \frac{\sum_{n=1}^n E S A_n \left\{ \frac{\alpha_n \operatorname{sh}(2\alpha_n h) - \beta_n \sin(2\beta_n h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_n h) + \cos^2(\beta_n h)]} \right\} e^{inot}}{\sum_{n=1}^n n^2 \omega^2 A_n e^{inot}} + \frac{E S A_1 \left\{ \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\}}{2(1+i\gamma) \sum_{n=1}^n n^2 \omega^2 A_n e^{inot}} \quad (6)$$

Оскільки амплітуди вищих гармонік коливань менше амплітуди основної (першої) гармоніки коливань, то у першому наближенні приведену масу бетонної суміші можна визначити із значень основної частоти вимушених коливань. При цьому вираз (6) перетворюється до наступного вигляду:

$$m_c = \frac{ES}{(1+i\gamma)\omega^2} \left\{ \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} + \frac{AES}{2A_1(1+i\gamma)\omega^2} \left\{ \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} e^{-inot} \quad (7)$$

Помножимо чисельник та знаменник першого та другого доданків виразу (8) на уявне число, яке спряжене зі знаменником:

$$m_c = \frac{ES(1-i\gamma)}{(1+\gamma^2)\omega^2} \left\{ \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} + \frac{AES(1+i\gamma)}{2A_1(1+\gamma^2)\omega^2} \left\{ \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} (\cos ot - i \sin ot) \quad (8)$$

Виділяючи із комплексної функції (8) дійсну частину, знайдемо шукане значення приведеної маси бетонної суміші при асиметричному кінематичному збудженні коливань:

$$m_c = \frac{ES}{(1+\gamma^2)\omega^2} \left\{ \frac{\alpha_1 \operatorname{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\operatorname{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} \times \left[ 1 + \frac{A}{2A_1} (\cos ot + \gamma \sin ot) \right] dt \quad (9)$$

Аналіз отриманого виразу (9) показує, що приведена маса бетонної суміші при асиметричному кінематичному збудженні коливань має змінний характер, тобто змінюється в часі.

При використанні дискретної моделі доцільно використовувати постійну величину приведеної маси у вигляді її середнього значення. Величина середнього значення приведеної маси бетонної суміші за повний цикл одного коливання, тобто за час  $T = t_1 + t_2$  буде рівна:

$$\begin{aligned} m_{cp} &= \int_0^{t_1+t_2} \frac{ES}{(t_1+t_2)(1+\gamma^2)\omega^2} \left\{ \frac{\alpha_1 \text{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\text{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} \times \left[ 1 + \frac{A}{2A_1} (\cos \omega t + \gamma \sin \omega t) \right] dt = m'_c + m''_c = \\ &= \int_0^{t_1} \frac{ES}{(t_1+t_2)(1+\gamma^2)\omega^2} \left\{ \frac{\alpha_1 \text{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\text{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} \times \left[ 1 + \frac{A}{2A_1} (\cos \omega t + \gamma \sin \omega t) \right] dt + \\ &\int_{t_1}^{t_1+t_2} \frac{ES}{(t_1+t_2)(1+\gamma^2)\omega^2} \left\{ \frac{\alpha_1 \text{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\text{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} \times \left[ 1 + \frac{A}{2A_1} (\cos \omega t + \gamma \sin \omega t) \right] dt. \end{aligned} \quad (10)$$

Звідки найдемо

$$m'_c = \frac{ES\tau_1}{(1+\gamma^2)\omega^2(t_1+t_2)} \left\{ \frac{\alpha_1 \text{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\text{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\}; \quad (11)$$

$$m''_c = \frac{ES\tau_2}{(1+\gamma^2)\omega^2(t_1+t_2)} \left\{ \frac{\alpha_1 \text{sh}(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[\text{sh}^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\}, \quad (12)$$

де  $\tau_1 = t_1 + \frac{A}{2\omega A_1} [\sin \omega t_1 + \gamma(1 - \cos \omega t_1)]$ ;  $\tau_2 = t_2 - t_1 + \frac{A}{2\omega A_1} [\sin \omega t_2 - \sin \omega t_1 + \gamma(\cos \omega t_2 - \cos \omega t_1)]$ .

Для визначення активного опору використовуємо наступну тотожність:

$$b \frac{dz(t)}{dt} = iES\gamma \frac{\partial u(0,t)}{\partial z}, \quad (13)$$

де  $b$  – коефіцієнт непружного опору цементобетонної суміші.

Із виразу (12) слідує:

$$b = \frac{iES\gamma \frac{\partial u(0,t)}{\partial z}}{\frac{dz(t)}{dt}}. \quad (14)$$

При кінематичному збудженні від кулачкового механізму на кутову частоту коливань рухомої рами  $\omega$  накладається більш висока гармоніка, тобто виникає супергармонійна дія на ущільнююче середовище тому швидкість коливань рухомої рами описується рівнянням (15):

$$\frac{d^2 z(t)}{dt^2} = - \sum_{n=1}^n n^2 \omega^2 A_n e^{in\omega t}. \quad (15)$$

де  $A$  – амплітуда переміщень;

Підставляючи в формулу (14) вираз (4) та (15), отримаємо функціональну залежність для визначення коефіцієнта непружного опору бетонної суміші:

$$b = \frac{\sum_{n=1}^n iES\gamma A_n \left\{ \frac{\alpha_n \text{sh}(2\alpha_n h) - \beta_n \sin(2\beta_n h)}{2[\text{sh}^2(\alpha_n h) + \cos^2(\beta_n h)]} \right\} e^{in\omega t}}{\sum_{n=1}^n n\omega A_n e^{in\omega t}} +$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{iES\gamma A}{2} \left\{ \frac{\alpha_1 sh(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[sh^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} \\
 & + \frac{\sum_{n=1}^n n\omega A_n e^{in\omega t}}{\quad} \quad (16)
 \end{aligned}$$

Визначимо в першому наближенні коефіцієнт непружного опору бетонної суміші виходячи із значень основної частоти вимушуючи коливань. При цьому вираз (16) перетворюється до наступного вигляду:

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{iES\gamma}{\omega} \left\{ \frac{\alpha_n sh(2\alpha_n h) - \beta_n \sin(2\beta_n h)}{2[sh^2(\alpha_n h) + \cos^2(\beta_n h)]} \right\} + \\
 & + \frac{iES\gamma A}{2A_1\omega} \left\{ \frac{\alpha_1 sh(2\alpha_1 h) - \beta_1 \sin(2\beta_1 h)}{2[sh^2(\alpha_1 h) + \cos^2(\beta_1 h)]} \right\} e^{-i\omega t}. \quad (17)
 \end{aligned}$$

Виділяючи із комплексної функції (17) уявну частину, знайдемо шукане значення еквівалентного коефіцієнта непружного опору бетонної суміші при асиметричному кінематичному збудженні коливань:

$$b_{\text{екв}} = \frac{ES\gamma}{\omega} \left\{ \frac{\alpha_n sh(2\alpha_n h) - \beta_n \sin(2\beta_n h)}{2[sh^2(\alpha_n h) + \cos^2(\beta_n h)]} \right\} \cdot \left[ 1 + \frac{A}{2A_1} \cos\omega t \right]. \quad (18)$$

В роботі [3] приведені залежності для визначення приведеної маси та еквівалентного коефіцієнта непружного опору бетонної суміші в процесі вібраційного ущільнення:

$$m_c' = \frac{2\rho S(\alpha_1 sh 2\alpha_1 h + \beta_1 \sin 2\beta_1 h)\tau_1}{(a_1^2 + \beta_1^2)(ch 2\alpha_1 h + \cos 2\beta_1 h)(\tau_1 + \tau_2)} \quad \text{при } 0 \leq t \leq \tau_1; \quad (19)$$

$$m_c'' = \frac{2\rho S(\alpha_1 sh 2\alpha_1 h + \beta_1 \sin 2\beta_1 h)\tau_2}{(a_1^2 + \beta_1^2)(ch 2\alpha_1 h + \cos 2\beta_1 h)(\tau_1 + \tau_2)} \quad \text{при } \tau_1 \leq t \leq T; \quad (20)$$

$$b_{\text{екв}} = \frac{ES\gamma \sum_{n=1}^{\infty} n \sqrt{\mu_n^2 + \nu_n^2} \cos \left[ n\omega t - \frac{dn}{an} \right] N_{11}}{\sum_{n=1}^n n^2 \sqrt{\mu_n^2 + \nu_n^2} \cos \left[ n\omega t - \frac{dn}{an} \right]}, \quad (21)$$

Дослідна перевірка проведена в лабораторіях Національного університету "Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка" [10] показала, що виведені та запропоновані залежності (9), (12) и (16) дають розходження  $m_c'$ ,  $m_c''$  и  $b_{\text{екв}}$  з експериментальними даними не більше 15%.

В той же час значення приведеної маси та еквівалентного коефіцієнта непружного опору бетонної суміші в процесі вібраційного ущільнення  $m_c'$ ,  $m_c''$  и  $b_{\text{екв}}$ , які визначені по відомим залежностям (19-21) [3], дають розходження з експериментальними даними не менше 35%.

**6. Висновки.** Отримані залежності (9-12) і (18) визначають реактивний й активний опори середовища коливанням робочого органу вібраційно ударної установки. Стає можли-

вим використання коефіцієнтів  $b_{екв}$  й  $m_c$  у рівняннях спільного руху робочого органу і середовища, які включають у себе зосереджені параметри робочих органів і розподіленні параметри оброблюваних середовищ.

Отримані залежності мають практичне значення, оскільки спрощують розв'язання задач шляхом усунення необхідності явного визначення коефіцієнтів гармонійних умов і дозволяють оцінювати рух континуального середовища за складних законів руху із збереженням хвильових процесів.

Практична значущість розробки полягає у спрощенні розрахунків, оскільки відсутня необхідність явного визначення коефіцієнтів для гармонійних умов. Це також дозволяє ефективніше моделювати рух континуального середовища при складних законах руху системи, зберігаючи хвильові процеси.

Запропонована методика може бути застосована для оптимізації параметрів робочих органів вібраційного обладнання, що використовується у будівельній індустрії, зокрема при ущільненні бетонних сумішей.

### Список використаних джерел:

1. Назаренко І.І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії / І.І. Назаренко. – Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2007. – 230с ISBN 978-966-627-134-7.
2. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем / І.І. Назаренко // Навчальний посібник (2-е видання). – К.: 2010. – 440 с.
3. Nazarenko II, Ruchynskyy MM, Terenchuk SA, “Doslidzhennya rezhymnykh ta enerhetychnykh kharakterystyk prohresyvykh vibromashyn”, Visnyk NTUU «KPI», Vol. 63, (2011), ss.214-218. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2011.63.58587>.
4. Pîntoi R., Barbu A.M., Ionescu A. (2020). Vibrations influence on concrete compaction. Applied Mechanics and Materials, 896, 355-360
5. AG Maslov, Vibratsionnyye mashyny dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnykh smesey : monografiya, AG Maslov, AF Itkin, YUS Salenko; Ministerstvo obrazovaniya i nauki Ukrainy, Kremenchugskiy nats. universitet imeni Mikhaïla Ostrogradskogo. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V. -2014. -324 s. ISBN 978-617-639-056-5.
6. Maslov O., Janar Batsaikhan, Salenko Yu (2018). The Theory of Concrete Mixture Vibratory Compacting. International Journal of Engineering & Technology, Vol. 7 (3.2), pp 239-244.
7. Ivan Nazarenko, Oleksandr Diachenko, Vasyl Pryhotskyi, Mykola Nesterenko Structural analysis of vibration platform for panel units forming and consideration of its utilizing options. Academic journal «Industrial machine building, civil engineering». 2021. №1(56). P.37-42.
8. Визначення енергії при реалізації ударної взаємодії форми із обмежником коливань / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, Т.М. Нестеренко, В.В. Ведмідь // Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2023 : зб. тез доп. 3-ї Міжнар. наук.-техн. конф., 1 – 3 черв. 2023 р. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – С. 324-326.
9. Vibrating tables with the spatial oscillations of the moving frame technological properties for forming reinforced concrete products / M.P. Nesterenko, M.M. Nesterenko, O.V. Orysenko, T.O. Sklyarenko // Academic Journal Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2019. – Vol. 2 (53). – P. 13-19. <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1881>
10. Пічугін С.Ф. Дослідження режимів ущільнення легкобетонних сумішей на ударно-вібраційній установці методом математичного планування експерименту / С.Ф. Пічугін, М.М. Нестеренко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Вип. 1 (36). Т. 1. – С. 183-190.

### References:

1. I.I. Nazarenko, Vibratsiyni mashyny i protsesy budivel'noyi industriyi, KNUBA, Kyiv, 2007, 230s. ISBN 978-966-627-134-7.
2. I.I. Nazarenko, Prykladni zadachi teoriyi vibratsiynykh system, Vydavnychyy Dim «Slovo», Kyiv, 2010, 440s.)

3. Nazarenko II, Ruchynskyy MM, Terenchuk SA, “Doslidzhennya rezhymnykh ta enerhetychnykh kharakterystyk prohresyvnykh vibromashyn”, Visnyk NTUU «KPI», Vol. 63, (2011), ss.214-218. <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2011.63.58587>.
4. Pințoi R., Barbu A.M., Ionescu A. (2020). Vibrations influence on concrete compaction. *Applied Mechanics and Materials*, 896, 355-360
5. AG Maslov, Vibratsionnyye mashyny dlya prigotovleniya i uplotneniya betonnykh smesey : monografiya, AG Maslov, AF Itkin, YUS Salenko; Ministerstvo obrazovaniya i nauki Ukrainy, Kremenchugskiy nats. universitett imeni Mikhaïla Ostrogradskogo. Kremenchuk: PP Shcherbatykh O.V. -2014. -324 s. ISBN 978-617-639-056-5.
6. Maslov O., Janar Batsaikhan, Salenko Yu (2018). The Theory of Concrete Mixture Vibratory Compacting. *International Journal of Engineering & Technology*, Vol. 7 (3.2), pp 239-244.
7. Ivan Nazarenko, Oleksandr Diachenko, Vasyl Pryhotskyi, Mykola Nesterenko Structural analysis of vibration platform for panel units forming and consideration of its utilizing options. *Academic journal «Industrial machine building, civil engineering»*. 2021. №1(56). P.37-42.
8. Nazarenko I.I., Nesterenko M.M., Nesterenko T.M., Vedmid V.V. Determination of Energy during the Implementation of Impact Interaction of a Shape with a Vibration Limiter // *Prospects for the Development of Mechanical Engineering and Transport – 2023: Proc. of the Abstracts of the 3rd Int. Sci.-Tech. Conf.*, June 1–3, 2023. – Vinnytsia: VNTU, 2023. – P. 324-326.
9. Vibrating tables with the spatial oscillations of the moving frame technological properties for forming reinforced concrete products / M.P. Nesterenko, M.M. Nesterenko, O.V. Orysenko, T.O. Sklyarenko // *Academic Journal Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 2 (53). – P. 13-19. <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1881>
10. Pichuhin S.F. Research on Compaction Modes of Lightweight Concrete Mixtures on an Impact-Vibration Unit Using the Method of Mathematical Experiment Planning / S.F. Pichuhin, M.M. Nesterenko // *Collection of Scientific Papers (Sectoral Mechanical Engineering, Construction)*. – Poltava: PoltNTU, 2013. – Issue 1 (36), Vol. 1. – P. 183-190.



УДК 378.147:621

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0407>**Ігор Косминський,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та обладнання технологічних процесів Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,

просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0234-7166>E-mail: [kosmyskiy.iv@knuba.edu.ua](mailto:kosmyskiy.iv@knuba.edu.ua)

## ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ ДИСЦИПЛІНИ "МЕТОДИКА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ" ДЛЯ МАГІСТРІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ "ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ"

**АНОТАЦІЯ.** Мета цієї роботи – визначення особливостей викладання дисципліни "Методика наукових досліджень" для магістрів спеціальності "Галузеве машинобудування". У статті проаналізовано сучасні освітні методики, запропоновано адаптацію навчальних програм із використанням реальних кейсів інженерної практики, впровадження інноваційних технологій, проектно-орієнтованого навчання та створення міждисциплінарних команд для розв'язання складних інженерних задач.

**Ключові слова:** методика наукових досліджень, галузеве машинобудування, проектно-орієнтоване навчання, наукове письмо, інноваційні технології, міждисциплінарність.

## FEATURES OF TEACHING THE DISCIPLINE "METHODICS OF SCIENTIFIC RESEARCH" FOR MASTERS OF THE SPECIALTY "INDUSTRY MECHANICAL ENGINEERING"

**ABSTRACT.** The purpose of this work is to determine the features of teaching the discipline "Methodology of scientific research" for masters in the specialty "Industrial mechanical engineering". The article analyzes modern educational methods, proposes the adaptation of curricula using real cases of engineering practice, the introduction of innovative technologies, project-oriented learning and the creation of interdisciplinary teams to solve complex engineering problems.

**Keywords:** methodology of scientific research, industrial mechanical engineering, project-oriented learning, scientific writing, innovative technologies, interdisciplinarity.

### 1. Постановка проблеми.

**1.1 Значення дисципліни у системі підготовки.** Дисципліна "Методика наукових досліджень" формує у студентів критичне мислення, здатність аналізувати сучасні наукові тенденції, визначати актуальні проблеми, формулювати гіпотези та обирати методи дослідження [1]. Для магістрів галузевого машинобудування важливо навчитися використовувати ці навички у реальних виробничих умовах. Наприклад, оптимізація процесів виготовлення деталей машин чи аналіз динамічних характеристик механізмів потребують володіння інструментами математичного моделювання, збору та обробки експериментальних даних [2].

**1.2 Проблеми, які виникають у викладанні.** Відсутність адаптованих методик, які враховують технічну специфіку дисципліни. Недостатнє залучення студентів до активного навчання через відсутність практичного контексту. [3]. Обмежені можливості використання сучасного програмного забезпечення у навчальному процесі. [4].

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження методів викладання дисциплін у технічних університетах представлені у працях:

- Комарова М. С. (2019) – підкреслюється важливість інтеграції реальних виробничих кейсів у процес навчання [1].

- Гайдамаки В. Ф. (1989) – автор акцентує увагу на використанні систем моделювання для аналізу складних механічних систем [2].

- Семенюка В. Ф. (2022) – розглядається питання застосування міждисциплінарного підходу у підготовці інженерів [5].

Незважаючи на значний поступ у розвитку навчальних методик, питання адаптації дисципліни "Методика наукових досліджень" до потреб галузевого машинобудування залишається недостатньо дослідженим.

### 3. Мета і методологія.

**3.1 Мета.** Розробити адаптовану методику викладання дисципліни "Методика наукових досліджень", яка сприятиме розвитку у студентів навичок наукового мислення, дослідницької роботи і аналізу даних у специфічних умовах галузевого машинобудування [1].

### 4. Матеріали і методи.

- Аналіз навчальних програм провідних університетів України та світу[5].
- Опитування студентів магістратури щодо ефективності існуючих підходів.
- Розробка кейсів на основі реальних виробничих завдань.
- Моделювання навчальних ситуацій з використанням програмного забезпечення (Ansys, MATLAB).

### 5. Результати дослідження.

**5.1. Інтеграція реальних кейсів.** Реальні інженерні задачі є основою для формування навичок, необхідних магістрам галузевого машинобудування. Основним принципом інтеграції таких задач у навчальний процес є їх відповідність навчальним цілям освітньої компоненти, а також доступність для моделювання та аналізу.

Типи кейсів, які пропонуються для студентів:

1. Дослідження міцності металевих конструкцій. Задача може полягати в аналізі напруг у зварних з'єднаннях мостових кранів, моделюванні напружено-деформованого стану металоконструкцій або бетонної суміші.

2. Аналіз динамічних характеристик механізмів. Студенти досліджують коливання у приводних механізмах машин з використанням програмного забезпечення.

3. Оптимізація енерговитрат. Завдання включають розробку алгоритмів мінімізації енергоспоживання у виробничих процесах.

Реалізація кейсів в аудиторній та роботі за межами аудиторій:

- В аудиторії: обговорення задач і побудова математичних моделей.
- Поза аудиторією: виконання симуляцій, аналіз отриманих даних, підготовка презентацій.

Приклад виконаного студентами кейсу:

Таблиця 1. Приклад задачі для аналізу механізмів.

Table 1. Example of a problem for mechanism analysis.

Завдання	Етапи роботи	Очікуваний результат
Моделювання передач у редукторі	1. Побудова моделі передачі в SolidWorks.	Візуалізація та розрахунок напруг.
	2. Симуляція у MATLAB для визначення динамічних характеристик.	Оцінка динамічних навантажень.
	3. Розробка рекомендацій щодо оптимізації конструкції.	Скорочення маси та підвищення надійності.

**5.2. Використання інноваційних технологій.** У сучасному навчальному процесі великого значення набуває використання спеціалізованого програмного забезпечення. Це дозволяє студентам не лише теоретично вивчати наукові підходи, але й опановувати інструменти для їх реалізації [4].

### Застосування програмного забезпечення:

#### 1. Ansys:

- Аналіз напружено-деформованого стану деталей машин.
- Моделювання теплових і механічних процесів у складних конструкціях.

#### 2. MATLAB:

- Розробка алгоритмів для аналізу та обробки експериментальних даних.
- Моделювання поведінки механічних систем у динаміці.

#### 3. SolidWorks:

- Тривимірне проектування машин і механізмів.
- Візуалізація роботи складних систем.

### Результати використання програмного забезпечення:

На Рисунку 1 наведено приклад аналізу динамічних навантажень у механічній системі. Завдяки використанню MATLAB та Ansys студенти змогли виявити критичні точки системи та запропонувати оптимізаційні заходи.

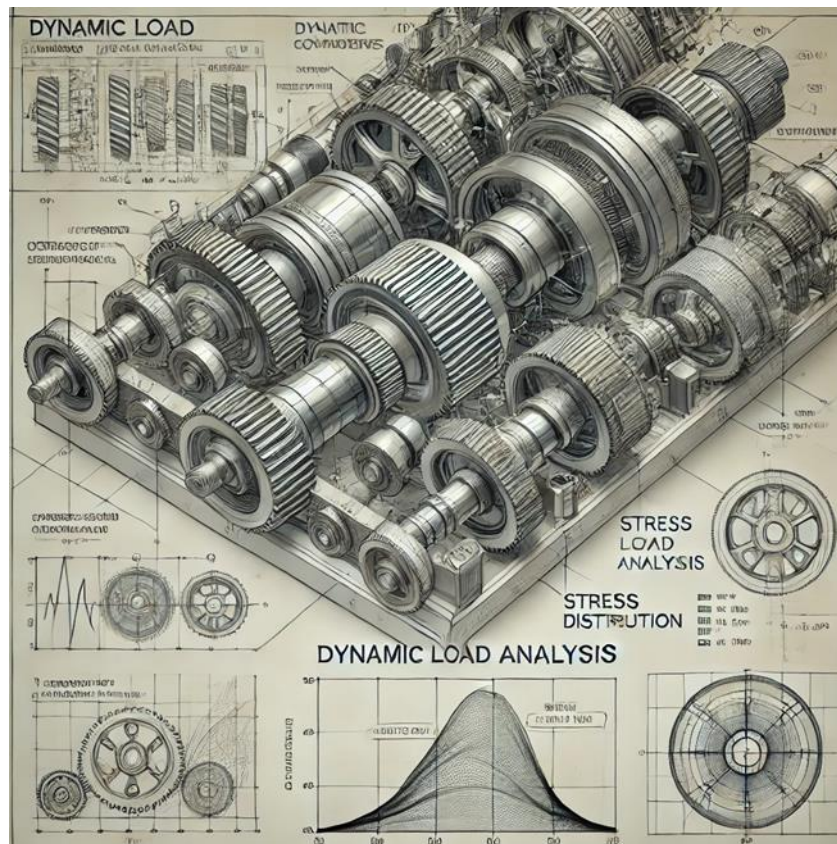


Рис. 1. Аналіз динамічних навантажень у механізмах

Fig. 1. Analysis of dynamic loads in mechanisms

**5.3. Проектно-орієнтоване навчання.** Проектно-орієнтоване навчання (PBL) є інноваційним підходом, який передбачає виконання студентами практичних проєктів у команді.

#### Переваги PBL:

- Забезпечення тісного зв'язку між теорією та практикою.
- Розвиток навичок управління часом, роботи у команді та вирішення складних задач.
- Можливість застосування міждисциплінарних знань для розв'язання комплексних інженерних задач.

#### Етапи реалізації PBL у дисципліні:

1. Формулювання проблеми: студенти отримують технічну задачу, наприклад, оптимізацію конструкції механізму для автоматизації виробничого процесу.

2. Планування: створення календарного плану проекту, розподіл обов'язків у команді (інженери-конструктори, програмісти, аналітики).

3. Виконання: збір та аналіз даних, розробка CAD-моделі, симуляція роботи механізму, оптимізація конструктивних рішень.

4. Презентація результатів: підготовка доповіді у форматі наукової конференції, включаючи демонстрацію моделі чи відео симуляції.

Приклад проекту: Розробка механізму для автоматичного зварювання швів

Мета проекту: створити механізм для зварювання, який забезпечить високу якість зварних швів при мінімальних витратах часу та матеріалів.

Етапи роботи студентів:

1. Дослідження технічного завдання: аналіз сучасних технологій автоматизації зварювального процесу.

2. Розробка CAD-моделі: створення тривимірної моделі механізму в SolidWorks.

3. Симуляція роботи:

- Використання Ansys для моделювання теплових полів і деформацій металу під час зварювання.

- Проведення динамічного аналізу механізму в MATLAB для перевірки його стабільності та точності рухів.

4. Оптимізація конструкції:

- Підбір матеріалів, які забезпечують зменшення маси при збереженні міцності.

- Перегляд геометрії компонентів для зменшення енерговитрат.

5. Підготовка звіту та презентація: оформлення технічної документації та представлення результатів у форматі презентації [5].

Результати проекту:

- Оптимізована конструкція механізму, яка скорочує час зварювання на 25% порівняно з існуючими аналогами.

- Зниження енерговитрат на 15% за рахунок використання легких сплавів і покращеної кінематики.

- Прототип механізму, готовий для впровадження на виробничій лінії.

**5.4. Взаємодія міждисциплінарних команд.** Формування міждисциплінарних команд дозволяє студентам залучати знання з різних галузей для вирішення складних технічних задач [3]. Наприклад:

- Інженери-матеріалознавці пропонують нові сплави для зменшення маси конструкції.

- Фахівці з IT розробляють алгоритми для автоматизації процесів.

- Геодезисти забезпечують точність позиціонування машин у просторі.

Таблиця 2. Приклад міждисциплінарного проекту

Table 2. Example of an interdisciplinary project

Завдання	Учасники проекту	Результати
Оптимізація конструкції крана	Інженери-механіки, матеріалознавці, IT-фахівці	Зменшення ваги конструкції на 15%, підвищення ефективності.

**Переваги взаємодії:**

1. Покращення комунікації між спеціалістами.

2. Формування комплексного бачення задачі.

3. Збільшення ефективності роботи над проектом.

**6. Висновки:**

1. Запропонована методика сприяє інтеграції теорії та практики.

2. Залучення реальних кейсів і проектів мотивує студентів до активного навчання.

3. Інноваційні технології розширюють можливості аналізу і моделювання.

4. Міждисциплінарний підхід забезпечує високий рівень підготовки фахівців [1,2,5].

**Список використаних джерел:**

1. Комаров М. С. Викладання технічних дисциплін: проблеми та перспективи. – К.: Техніка, 2019. – 352 с.
2. MATLAB User Guide. MathWorks, 2023. – 550 с.
3. Будіков Л. Я. Інноваційні технології в машинобудуванні: навчальний посібник. – Харків: ХНАДУ, 2021. – 410 с.
4. Шевченко С. І. Динаміка механізмів: теорія та практичне застосування. – Дніпро: Наукова думка, 2018. – 296 с.
5. Волошин М. М. Основи конструктивного проектування в галузевому машинобудуванні: підручник. – Київ: Інститут сучасного навчання, 2020. – 318 с.
6. SolidWorks Simulation. Getting Started Guide. – Dassault Systèmes, 2022. – 320 с.
7. Borkar, A., Smith, R. S. (2020). Finite Element Analysis of Mechanical Structures. New York: Springer, 2020. – 450 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20753-0>
8. Jenkins, R., O'Hara, L. (2019). Advanced Materials for Industrial Applications. Oxford: Elsevier, 2019. – 350 p.
9. Зайченко О. І. Методи математичного моделювання у машинобудуванні: монографія. – Одеса: Одеський національний університет, 2021. – 268 с.

**References:**

1. Komarov, M. S. (2019). Teaching Technical Disciplines: Problems and Prospects. Kyiv: Tekhnika. 352 p. {In Ukrainian}
2. MATLAB User Guide. (2023). MathWorks. 550 p.
3. Budikov, L. Ya. (2021). Innovative Technologies in Mechanical Engineering: Textbook. Kharkiv: KhNADU. 410 p. {In Ukrainian}
4. Shevchenko, S. I. (2018). Dynamics of Mechanisms: Theory and Practical Application. Dnipro: Naukova Dumka. 296 p. {In Ukrainian}
5. Voloshyn, M. M. (2020). Basics of Structural Design in Sectoral Mechanical Engineering: Textbook. Kyiv: Institute of Modern Education. 318 p. {In Ukrainian}
6. SolidWorks Simulation. (2022). Getting Started Guide. Dassault Systèmes. 320 p.
7. Borkar, A., Smith, R. S. (2020). Finite Element Analysis of Mechanical Structures. New York: Springer. 450 p. DOI: [10.1007/978-3-030-20753-0](<https://doi.org/10.1007/978-3-030-20753-0>).
8. Jenkins, R., O'Hara, L. (2019). Advanced Materials for Industrial Applications. Oxford: Elsevier. 350 p.
9. Zaichenko, O. I. (2021). Methods of Mathematical Modeling in Mechanical Engineering: Monograph. Odesa: Odesa National University. 268 p. {In Ukrainian}

УДК 623.413:625.7:69.002

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0408>

**Андрій Задорожний,**

кандидат технічних наук,  
доцент Військового інституту танкових військ  
Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут",  
вулиця Кирпичова, 2, м. Харків, 61000, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1031-0585>  
E-mail: [zsnj1971@ukr.net](mailto:zsnj1971@ukr.net)

**Юрій Човнюк,**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри міського будівництва,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0608-0203>  
E-mail: [ychovnyuk@ukr.net](mailto:ychovnyuk@ukr.net)

**Петро Чередніченко,**

доцент кафедри міського будівництва,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-661X>  
E-mail: [petro\\_che@ukr.net](mailto:petro_che@ukr.net)

**Ганна Васильєва,**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри міського будівництва,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0557-6925>  
E-mail: [anvas677@gmail.com](mailto:anvas677@gmail.com)

**Марія Биваліна,**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри міського будівництва,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0650-4237>  
E-mail: [Gekata3@ukr.net](mailto:Gekata3@ukr.net)

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РУХУ БУДІВЕЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ І (ГУСЕНИЧНИХ) МАШИН З УРАХУВАННЯМ ЛІНІЙНОГО ОПОРУ, ПРОПОРЦІЙНОГО ШВИДКОСТІ ПЕРЕМІЩЕННЯ**

**АНОТАЦІЯ.** У роботі обґрунтована методика оптимізації динамічних режимів руху будівельних механізмів і гусеничних машин з урахуванням лінійного опору, пропорційного швидкості переміщення об'єкту у середовищі функціонування. Задля оптимізації режиму руху зазвичай використовуються одиничні критерії, котрі відображають ті чи інші властивості будівельних механізмів і гусеничних машин або комплексні, що відображають комплекс їх властивостей. Визначений на фізично обґрунтованій основі оптимальний режим руху, який приводить до мінімізації силових навантажень у приводному механізмі. Для цього сформульований узагальнений інтегральний динамічний критерій для координати руху у формі критеріальної дії за Аппелем, у якому врахована складова сили опору, пропорційна швидкості руху механізму/машини. Використання методів класичного варіаційного числення дозволяє встановити оптимальні значення основних динамічних характерис-

тик руху будівельних механізмів і гусеничних машин, закони таких рухів, за яких мінімізуються протягом періоду пуску (гальмування, реверсування) величина навантаження на приводний механізм машини. Отримані у роботі результати можуть у подальшому бути використані для уточнення й вдосконалення інженерних методів розрахунку характеристик руху будівельних машин (зокрема, з гусеничною ходюю) та механізмів як на стадіях їх проектування/конструювання, так і у режимах реальної експлуатації, у перехідних процесах (пуск, гальмування, реверсування та ін.) з метою створення сприятливих (енергоощадних та безаварійних) умов їх функціонування.

**Ключові слова:** оптимізація, динамічний режим, будівельні механізми, гусеничні машини, опір, пропорційний швидкості руху, узагальнений критерій Аппеля, варіаційне числення, математичне моделювання, перехідні режими, пуск.

## OPTIMIZATION OF DYNAMIC MODES OF MOTION OF CONSTRUCTION MECHANISMS AND (CRAWLER) MACHINES TAKING INTO ACCOUNT LINEAR RESISTANCE PROPORTIONAL TO THE SPEED OF DISPLACEMENT

**ABSTRACT.** The paper substantiates the methodology of optimization of dynamic modes of motion of construction mechanisms and tracked machines taking into account linear resistance proportional to the speed of movement of the object in the operating environment. To optimize the mode of motion, usually single criteria reflecting certain properties of construction mechanisms and crawler machines or complex criteria reflecting the complex of their properties are used. The optimal mode of motion, which leads to minimization of force loads in the drive mechanism, is determined on a physically justified basis. For this purpose, a generalized integral dynamic criterion for the motion coordinate is formulated in the form of the criterion action by Appel, in which the component of the resistance force proportional to the mechanism/machine speed is taken into account. The use of methods of classical variational calculus allows us to establish the optimal values of the main dynamic characteristics of the movement of construction mechanisms and crawler machines, laws of such movements, at which minimize during the period of start-up (braking, reversing) the amount of load on the drive mechanism of the machine. The results obtained in the work can be further used to clarify and improve engineering methods of calculation of motion characteristics of construction machines (in particular, with crawler) and mechanisms both at the stages of their design/construction and in the modes of real operation, in transient processes (start-up, braking, reversing, etc.) in order to create favorable (energy-saving and accident-free) conditions of their functioning.

**Keywords:** optimization, dynamic mode, construction mechanisms, tracked machines, resistance proportional to the speed of motion, generalized Appel criterion, calculus of variations, mathematical modeling, transient modes, start-up.

**1. Постановка проблеми.** Режими руху будівельних механізмів і, зокрема, гусеничних машин мають значний вплив на якість виконання різноманітних технологічних процесів, їхню продуктивність, надійність, енергетичні витрати тощо. Проблемі оптимізації режимів руху машин і механізмів присвячена велика кількість вітчизняних та зарубіжних досліджень. Проте зазвичай у критеріальних діях враховують, як правило, тільки інерційну складову опору, що виникає на різних стадіях перехідних процесів (пуск, гальмування чи реверсування). Але, без сумніву, на думку авторів даного дослідження, важливим у створенні критеріальної дії є врахування сил опору іншої фізичної природи. Саме ця проблема у певній мірі вирішена й у даному дослідженні.

**2. Аналіз публікацій по темі дослідження.** Дослідженню та всебічному аналізу проблеми оптимізації режимів руху машин та механізмів присвячені роботи авторів [1-19]. У основному тут розглядалися задачі оптимізації без врахування сил опору, які виникають під час руху. Автор [19] досліджує оптимізаційні динамічні режими руху механізмів і машин, враховуючи при цьому опір середовища, пропорційний швидкості руху об'єкта (машини/механізму). Проте у цитованій роботі допущено кілька помилок: 1) рівняння Ейлера-Лагранжа виведене з помилковим коефіцієнтом при швидкості руху машини ( $V$ ); 2) термінальні (початкові та кінцеві умови руху) наведені у такому вигляді, який не дозволяє встановити причинно-наслідковий зв'язок між початковими та кінцевими параметрами руху (машини/механізму), тобто є фізично необґрунтованими (порушуються низки законів механіки, зокрема перший та другий закони І. Ньютона). У даному дослідженні ці помилки усунені, а терміна-

льні умови руху є фізично обґрунтованими і такими, що логічно (без протиріччя щодо законів класичної механіки) пов'язують між собою причини, котрі призвели до руху об'єкта, з наслідками, до яких призвів цей рух на завершальній стадії перехідного процесу (пуску механізму/машини).

**3. Метою даного дослідження** є обґрунтування, на основі законів класичної механіки І. Ньютона, та розробка методики оптимізації режимів руху будівельних механізмів і гусеничних машин з урахуванням опору середовища (у якому відбувається цей рух), пропорційно швидкості руху об'єкта. Такий підхід дозволяє, на думку авторів даної роботи, мінімізувати силові навантаження у приводному механізмі. Для досягнення мети дослідження у даній роботі використані методи математичного та фізико-механічного моделювання, класичного варіаційного числення, диференціальних рівнянь та узагальненої критеріальної дії за Аппелем.

**4. Виклад основного змісту дослідження.** Зазвичай для оптимізації режиму руху механізму або (гусеничної) машини використовуються одиничні критерії класичної механіки, котрі відображають певним чином різноманітні властивості цих механізмів і машин, або ж комплексні, що відображають цілий комплекс властивостей. У даному дослідженні визначимо оптимальний режим руху, який приводить до мінімізації силових навантажень у приводному механізмі. Для цього слід сформулювати інтегральний динамічний критерій у формі критеріальної дії за Аппелем, у якому враховується складова сили опору, пропорційна швидкості руху.

Відомо [1, 2], що критеріальна дія за Аппелем враховує лише інерційну складову опору, яка виникає на ділянках перехідних процесів (пуск, гальмування чи реверсування) й для будівельного механізму або (гусеничної) машини з одним ступенем вільності основного руху, зведеного, наприклад, до поступальної ланки, представляється у такому вигляді:

$$I_A = \int_0^{t_1} V dt = \int_0^{t_1} \frac{1}{2} m \dot{v}^2 dt \quad (1)$$

де  $V$  – «енергія прискорень механізму або машини [1, 2];  $t$  – час;  $t_1$  – тривалість руху;  $m$  – зведена маса механізму або машини;  $v$  – швидкість руху;  $\dot{v}$  – пришвидшення руху зведеної маси.

При врахуванні сили опору «енергія» прискорень для руху приведеної матеріальної маси з одним ступенем вільності (руху) може бути представлена залежністю [14]:

$$V^* = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (W + F_0/m)^2 \quad (2)$$

де  $W = \dot{v}$  – прискорення зведеної маси;  $F_0$  – зведена сила опору, що діє на елементи механізму чи машини.

Якщо сила опору  $F_0$  лінійно пропорційна швидкості, тобто  $F_0 = b \cdot v$ , тоді вираз (2) представляється залежністю:

$$V^* = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\dot{v} + k \cdot v)^2 \quad (3)$$

Тут, у (3),  $b$  – коефіцієнт пропорційності, а  $k = b/m$ .

Тоді інтегральний критерій для оптимізації режиму руху з урахуванням опору, пропорційного швидкості, має вигляд [19]:

$$\dot{I}_A = \int_0^{t_1} \frac{1}{2} m \cdot (\dot{v} + kv)^2 dt \quad (4)$$

Враховуючи, що  $v = \dot{q}$ , де  $q(t)$  – узагальнена координата руху (наприклад, центру мас механізму/машини), вираз (4) можна подати у найбільш загальному виді:



$$\dot{I}_A = \int_0^{t_1} \frac{1}{2} m \cdot (\ddot{q} + k\dot{q})^2 dt \quad (5)$$

Умовою мінімуму критерію (5) є рівняння Ейлера-Пуассона:

$$-\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial V^*}{\partial \dot{q}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\partial V^*}{\partial \ddot{q}} \right) = 0 \quad (6)$$

Після підстановки виразу  $V^*$  у формі:

$$V^* = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\ddot{q} + k \cdot \dot{q})^2 \quad (7)$$

у рівняння (6), матимемо:

$$q^{(IV)} - k^2 \cdot \ddot{q} = 0 \quad (8)$$

Розв'язок (8) для  $\ddot{q}(t)$  можна подати у наступному вигляді:

$$\ddot{q}(t) = C_1 \cdot e^{kt} + C_2 \cdot e^{-kt} \quad (9)$$

де  $C_1$  та  $C_2$  – постійні інтегрування, які визначаються з термінальних (початкових і кінцевих) умов руху. Для пуску зі стану  $t=0$ ,  $\ddot{q}(0)=a(0)$ , у стан деякої сталої швидкості  $V=V_1$  при  $t=t_1$ ,  $\ddot{q}(t_1)=0$ , прискорення  $\ddot{q}(t)$  визначається залежністю:

$$\ddot{q}(t) = -\frac{a(0) \cdot \text{sh}[k \cdot (t-t_1)]}{\text{sh}(k \cdot t_1)}, \quad (10)$$

де  $a(0)$  – початкове (у момент  $t=0$ ) прискорення руху маси механізму чи машини, за рахунок котрого й відбувається рух об'єкту у проміжку часу  $t \in [0; t_1]$ , а потім, для  $t \geq t_1$  механічна система починає рухатись рівномірно, зі швидкістю  $V_1$ . Автор [19] зовсім не визначає причини, яка вивела систему зі стану спокою ( $V=0, t=0$ ) у стан рівномірного руху (для  $t \geq t_1$ ) зі сталою швидкістю  $V=V_1$ .

Інтегруючи (10) один раз по  $t$ , можна визначити  $V(t)$ , якщо врахувати, що  $V(t)/_{t=t_1} = V_1$ :

$$\dot{q}(t) = V_t = -\frac{a(0) \text{ch}\{k(t-t_1)\}}{k \cdot \text{sh}(kt_1)} + V_1 + \frac{a(0)}{k \cdot \text{sh}(kt_1)}. \quad (11)$$

Інтегруючи (11) один раз по  $t$ , можна визначити закон руху маси  $q(t)$ , якщо врахувати, що  $q(t)/_{t=0} = 0$ , бо маса починає рухатись зі стану спокою  $q(t)/_{t=0} = \dot{q}(t)/_{t=0} = 0$ :

$$q(t) = \left\{ V_1 + \frac{a(0)}{k \cdot \text{sh}(kt_1)} \right\} \cdot t - \frac{a(0) \text{sh}\{k(t-t_1)\}}{k^2 \cdot \text{sh}(kt_1)} - \frac{a(0)}{k^2}. \quad (12)$$

Для будівельного механізму (міні-гусеничного робота) масою  $m=10^3$  кг, коефіцієнтом пропорційності опору  $b=1000$  Н/(м/с) і тривалістю пуску  $t_1=2$ с за залежностями (10), (11) побудовано графіки зміни швидкості  $\dot{q}(t)=V$  та прискорення  $\ddot{q}(t)=\dot{V}$  (рис.1).

Початкову швидкість  $V(0)$  тіло має завдяки наявності  $a(0) \neq 0$  й часу запуску приводного механізму двигуна, тобто:

$$V_0 = \frac{1}{2} \cdot a(0) \cdot t_0 \quad (13)$$

де  $t_0$  – тривалість запуску приводу двигуна механізму або машини. Зазначимо, що  $V_0 > V_1$ .

Якщо прийняти за початкову умову руху стан відносного спокою, тобто:

$$q|_{t=0} = \dot{q}|_{t=0} = 0, \quad (14)$$

який пропонує автор [19], тоді закон  $\dot{q}(t) = V(t)$  буде іншим, відмінним від (11), а саме:

$$\dot{q}(t) = V_t = \frac{a(0) \cdot \{ch[kt_1] - ch[k(t-t_1)]\}}{k \cdot sh(kt_1)} \quad (15)$$

Значення швидкості  $V_1$  руху механічної системи з моменту  $t \geq t_1$ , яка стає незмінною у часі (тобто рівномірного прямолінійного руху), набуває наступного значення:

$$V_1 = V|_{t=t_1} = \frac{a(0) \cdot th(kt_{1/2})}{k} \quad (16)$$

Закон руху  $q(t)$  при умові (14) у цьому випадку має вид:

$$q(t) = \frac{a(0) \cdot ch(kt_1)}{k \cdot sh(kt_1)} \cdot t - \frac{a(0) \cdot sh[k(t-t_1)]}{k^2 \cdot sh(kt_1)} - \frac{a(0)}{k^2} \quad (17)$$

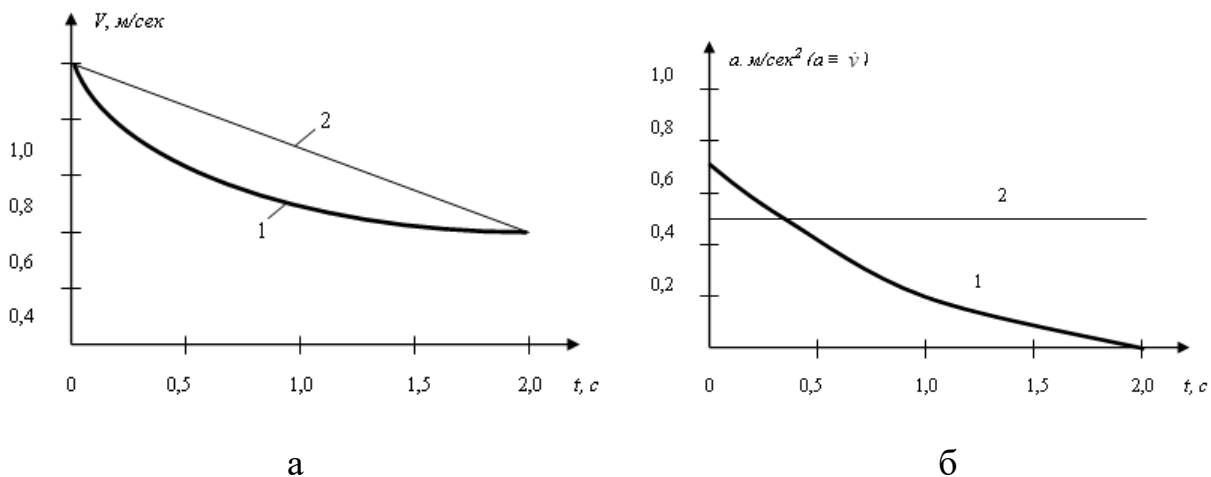


Рис.1 Графік зміни швидкості (а) і прискорення (б) зведеної маси з урахуванням опору (крива 1) і без врахування опору (крива 2) оптимального динамічного режиму пуску.

Fig. 1 Graph of changes in speed (a) and acceleration (b) of the combined mass with consideration of resistance (curve 1) and without consideration of resistance (curve 2) of the optimal dynamic start-up mode.

На рис.2 подані графіки зміни швидкості  $\dot{q}(t) = \dot{V}$  (у загальному випадку, для початкових умов (14)). Якісно вони співпадають з отриманим у [19], але необгрунтованими фізично, а шляхом виконання математичних маніпуляцій (диференціювання певного виразу для  $V^*$  по часу  $t$ ).

Розглянемо далі рух об'єкта у середовищі, яке створює опір цьому рухові, пропорційний квадрату швидкості руху ( $F_0 = \tilde{b} \cdot v^2$ ) [20]. Тоді інтегральний критерій для оптимізації режиму руху з урахуванням опору, пропорційного квадрату швидкості, має вигляд:

$$\dot{I}_A = \int_0^{t_1} \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\dot{v} + k \cdot v^2)^2 dt, k = \frac{b}{m}. \quad (18)$$

Враховуючи, що  $v = \dot{q}(t)$  можна (18) подати у більш узагальненому вигляді:

$$\dot{I}_A = \int_0^{t_1} \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\ddot{q} + k \cdot \dot{q}^2)^2 dt \quad (19)$$

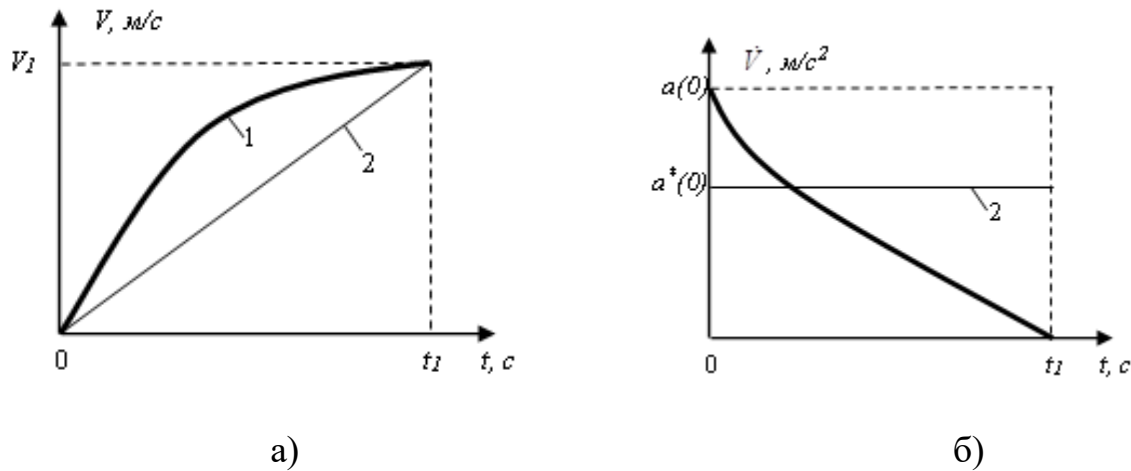


Рис.2 Графіки зміни швидкості (а) і прискорення (б) зведеної маси із урахуванням опору (крива 1) і без врахування опору (крива 2) оптимального динамічного режиму пуску (за початкових умов (14)),  $a^* = \text{const}$ .

Fig. 2 Graphs of changes in speed (a) and acceleration (b) of the combined mass with consideration of resistance (curve 1) and without consideration of resistance (curve 2) of the optimal dynamic start-up mode (under initial conditions (14)),  $a^* = \text{const}$ .

Рівняння Ейлера-Пуассона, як необхідна умова мінімізації функціоналу (19), має вид (6), і зводиться для  $q(t)$  до наступного:

$$\frac{d^2}{dt^2}(\ddot{q}) - 6k^2 \cdot \dot{q}^2 \cdot \ddot{q} = 0 \quad (20)$$

Рівняння (20) можна подати у вигляді:

$$\frac{d^2}{dt^2}(\ddot{q}) - \frac{d}{dt}(2k^2 \cdot \dot{q}^3) = 0 \quad (21)$$

Перший інтеграл (21) має вид:

$$\ddot{q} - 2k^2 \cdot \dot{q}^3 = \text{const}. \quad (22)$$

У подальшому розглядаємо розв'язки цього рівняння (22) за умови, що  $\text{const} = 0$ . При цьому матимемо для  $\dot{q}(t) \equiv v$  наступні співвідношення:

$$\frac{d^2 v}{dt^2} - 2k^2 \cdot v^3 = 0 \quad (23)$$

Рівняння (23) має для  $v(t)$  наступний розв'язок:

$$v(t) = \frac{1}{k \cdot t}, [k] = M^{-1}. \quad (24)$$

Тоді для прискорення  $\dot{v}(t)$  маємо:

$$\dot{v}(t) = -\frac{1}{k \cdot t^2} \quad (25)$$

Задля визначення закону руху механічної системи  $q(t)$  вважаємо, що виконуються наступні термінальні (початкові і кінцеві) умови:

$$q(t)/_{t=t_0} = q_0; \quad v(t)/_{t=t_0} = \dot{q}(t)/_{t=t_0} = v_0; \quad \dot{v}(t)/_{t=t_0} = a(0) \quad (26)$$

Тоді, інтегруючи один раз по  $t$  вираз (24) і враховуючи першу термінальну умову (26), матимемо:

$$q(t) = q_0 + \frac{1}{k} \cdot \ln(t/t_0) \quad (27)$$

Параметр  $t_0$  можна визначити зі співвідношення, яке випливає з (26) (остання умова):

$$a(0) = -\frac{1}{k \cdot t_0^2} \Leftrightarrow t_0 = \left\{ -\frac{1}{a(0) \cdot k} \right\}^{1/2}, \quad a(0) < 0 \quad (28)$$

Для  $v_0$  маємо:

$$v_0 = \frac{1}{k \cdot t_0} = \left\{ \frac{-a(0)}{k} \right\}^{1/2} \quad (29)$$

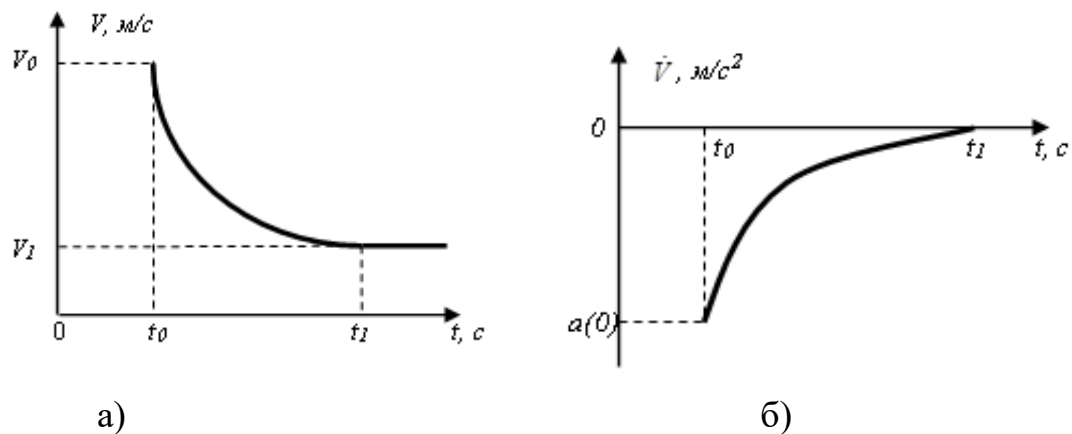


Рис. 3 Графіки зміни швидкості (а) і прискорення (б) зведеної маси із урахуванням (квадратичного за швидкістю руху) опору оптимального динамічного режиму пуску (за термінальних умов (26)).

Fig. 3 Graphs of changes in speed (a) and acceleration (b) of the combined mass taking into account (quadratic by the speed of movement) the resistance of the optimal dynamic start-up mode (under terminal conditions (26)).

Рівномірний рух системи зі швидкістю  $v_1$  після завершення стадії пуску ( $t \geq t_1$ ) визначається зі співвідношення:

$$v_1 = \frac{1}{k \cdot t_1} \quad (30)$$

Слід зазначити, що оскільки  $a(0) < 0$ , тоді  $v_0 > v_1$ . На рис.3 надані графіки зміни з плином часу  $t$  швидкості руху  $v(t)$  й прискорення  $\dot{v}(t)$ , коли рух здійснюється з якістю, що задовольняє мінімуму критерію (18), (19).

Зазначимо також, що подібні режими руху механічної системи, яка моделює будівельний механізм (чи гусеничну машину) можна реалізувати, наприклад: а) при підйомі вантажу краном способом «з основи»; б) при підйомі вантажів у воді (з dna річок, морів, океанів).

#### **Висновки:**

1. Обґрунтовані фізико-механічна та математична моделі, які дозволяють за критерієм Апелля оптимізувати динамічні режими руху будівельних механізмів і (гусеничних) машин з урахуванням лінійного (пропорційного швидкості руху) й нелінійного (пропорційного квадрату швидкості руху) опору середовища, в якому здійснюється пуск механічної системи, котрий, після завершення стадії пуску, переходить у рівномірний і прямолінійний. Це дозволяє мінімізувати навантаження на привід механізму/машини й суттєво зменшити можливість виникнення небажаних коливань у механічній системі.

2. Отримані у даному дослідженні результати можуть у подальшому бути використані для уточнення і вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку будівельних механізмів і гусеничних машин як на стадіях їх проектування / конструювання, так і у режимах реальної експлуатації з метою створення енергоощадних і безаварійних режимів функціонування такого обладнання.

#### **Список використаних джерел:**

1. Ловейкін В.С., Ловейкін А.В. Синтез оптимального за швидкістю режиму повороту екскаватора. Гірничі, будівельні, дорожні і меліоративні машини. – К.: КДТУБА, 1996. Вип. 50. С. 17-21.
2. Ловейкін В.С. Синтез оптимальних режимів руху приводних механізмів машин. Зб. Наукових праць НАУ. – К.: НАУ, 1997. С. 47-51.
3. Григоров О.В., Ловейкін В.С. Оптимальне керування рухом механізмів вантажопідйомних машин. Навч. Посібник. – К.: ІЗМН, 1997. 264 с.
4. Ловейкін В.С. Критерії оцінки режимів руху механізмів і машин. Збірник наукових праць НАУ. – К.: НАУ, 1998. С. 8-12.
5. Ловейкін В.С., Нестеров А.П. Синтез оптимальних режимів руху механічних систем. Доповіді НАН України. 1997. №7. С. 14-21.
6. Ловейкін В.С. Оптимізація режимів руху машин і механізмів у перехідних процесах. Машинознавство. 1999. №7. С. 24-31.
7. Ловейкін В.С. Синтез оптимальних режимів руху механізмів і машин у перехідних процесах. Машинознавство. 2001. №8 (50). С. 17-20.
8. Ловейкін В.С. Якість машин. – К.: КНУБА, 2001. 102 с.
9. Ловейкін В.С., Нестеров А.П. Динамічна оптимізація підйомних машин. Навч. Посібник. – Харків: ХНАДУ, 2002. 291 с.
10. Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В. Методи оптимізації режимів руху машин і механізмів. Сб. научных трудов ХНАДУ «Автомобильный транспорт». Совершенствование машин для земляных и дорожных работ. – Харьков, 2003. Вып. 11. С. 55-61.
11. Ловейкін В.С. Оптимізація динамічного режиму руху механізмів і машин з Урахуванням опору, пропорційного швидкості. Техніка будівництва. 2002. №13. С. 15-19.

#### **References:**

1. Loveikin V.S., Loveikin A.V. Syntez optymalnoho za shvydkistiu rezhymu povorotu ekskavatora. Hirnychi, budivelni, dorozhni i melioratyvni mashyny. – K.: KDTUBA, 1996. Vyp. 50. S. 17-21.
2. Loveikin V.S. Syntez optymalnykh rezhymiv rukhu pryvodnykh mekhanizmv mashyn. Zb. Naukovykh prats NAU. – K.: NAU, 1997. S. 47-51.
3. Hryhorov O.V., Loveikin V.S. Optymalne keruvannia rukhom mekhanizmv vantazhopidiomnykh mashyn. Navch. Posibnyk. – K.: IZMN, 1997. 264 s.
4. Loveikin V.S. Kryterii otsinky rezhymiv rukhu mekhanizmv i mashyn. Zbirnyk naukovykh prats NAU. – K.: NAU, 1998. S. 8-12.
5. Loveikin V.S., Nesterov A.P. Syntez optymalnykh rezhymiv rukhu mekhanichnykh system. Dopovidi NAN Ukrainy. 1997. №7. S. 14-21.

6. Loveikin V.S. Optymizatsiia rezhymiv rukhu mashyn i mekhanizmiv u perekhidnykh protsesakh. Mashynoznavstvo. 1999. №7. S. 24-31.
7. Loveikin V.S. Syntez optymalnykh rezhymiv rukhu mekhanizmiv i mashyn u perekhidnykh protsesakh. Mashynoznavstvo. 2001. №8 (50). S. 17-20.
8. Loveikin V.S. Yakist mashyn. – K.: KNUBA, 2001. 102 s.
9. Loveikyn V.S., Nesterov A.P. Dynamicheskaiia optymyzatsyia rodъemnykh mashyn. Monohrafiya. – Luhansk: Yzd-vo SNU, 2002. 368 s.
10. Loveikin V.S., Nesterov A.P. Dynamichna optymizatsiia pidiomnykh mashyn. Navch. Posibnyk. – Kharkiv: KhNADU, 2002. 291 s.
11. Loveikin V.S., Chovniuk Yu.V. Metody optymizatsii rezhymiv rukhu mashyn i mekhanizmiv. Sb. nauchnykh trudov KhNADU «Avtomobylnyi transport». Sovershenstvovanye mashyn dlia zemlianykh y dorozhnykh robot. – Kharkov, 2003. Выр. 11. S. 55-61.
12. Loveikin V.S. Optymizatsiia dynamichnoho rezhymu rukhu mekhanizmiv i mashyn z urakhuvanniam oporu, proportsiinoho shvydkosti. Tekhnika budivnytstva. 2002. №13. S. 15-19.

UDC 666.97:004.942

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>**Rostyslav Rudyk,**

Postgraduate student,

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

Pershotravneva Avenue 24, Poltava, 36011, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8386-977X>E-mail: [rostyslavrudyk@nupp.edu.ua](mailto:rostyslavrudyk@nupp.edu.ua)**Roman Salnikov,**

Postgraduate student,

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

Pershotravneva Avenue 24, Poltava, 36011, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0408-4358>E-mail: [roman.salnikov2952@gmail.com](mailto:roman.salnikov2952@gmail.com)**ANALYSIS OF THE MIXER GEOMETRY AND RHEOLOGY IMPACT ON CONCRETE MIXTURE MIXING EFFICIENCY**

**Abstract.** *The article discusses the problems associated with the mixing efficiency of concrete mixtures in gravity concrete mixers, which are widely used in construction sites due to their simplicity of design and mobility. Modern requirements for energy efficiency and quality control accuracy require the development of advanced methods that can ensure high homogeneity of concrete mixtures with minimal energy consumption. Considerable attention is paid to the influence of the geometry of the drum and the working bodies of the concrete mixer on the mixing process. Various approaches to mathematical modeling have been described, which take into account the physical and mechanical properties of the concrete mixture and the nature of its movement during rotation. The analysis of the rheological properties of concrete mixtures shows their significant impact on the mixing efficiency. Studies demonstrate that the proper selection of the drum rotation speed, the angle of inclination of the blades and the duration of mixing allows for an optimal balance between the various physical forces acting on the particles. Prospects for further research are highlighted, including the development of complex models that would take into account various factors and would allow predicting the behavior of the mixture in real conditions.*

**Keywords:** *gravity concrete mixer, mathematical modeling, mixing dynamics, rheological properties, blade geometry, numerical methods, mixing efficiency, energy efficiency, homogeneity of concrete mixture*

**1. Problem statement.** Gravity concrete mixers are widely used on construction sites due to their simple construction, mobility, and ability to effectively provide high-quality mixing of concrete mixtures. However, in the conditions of modern construction, where energy efficiency, rational use of materials and accuracy of control over the parameters of the mixture become especially important, there is a need to improve concrete preparation technologies.

The use of mathematical models makes it possible to investigate the influence of various factors, such as the speed of rotation of the drum, the humidity of the constituent materials and the mixing time, on the quality of the final product. However, the variety of approaches and models makes it difficult to choose the best option, which requires an in-depth comparative analysis. Scientists offer various modeling methods, from simple empirical dependencies to complex numerical models that take into account the physical processes inside the concrete mixer. Each approach has its own advantages and limitations, which depend on the conditions of application and requirements for the accuracy of the results.

The relevance of conducting a comparative assessment of these models is due to the growing requirements for the quality of construction work and the efficiency of equipment. Modern construction sites require technologies that provide not only consistently high quality concrete mixes, but also minimize the impact of the human factor and reduce energy costs. The article discusses the most common mathematical models, analyzes their features and effectiveness in practical application.

**2. Analysis of recent sources and publications.** Modern research is aimed at finding ways to improve the quality of mixing, reduce energy costs, as well as minimize the impact of factors that can negatively affect the final characteristics of the concrete mixture. In particular, models of mixture movement are actively studied in order to describe the dynamics of particles under different mixing conditions and to analyze the influence of geometric parameters of the working body on the efficiency of the process [1].

Work in recent years highlights the importance of blade geometry and drum shape of a gravity concrete mixer to intensify the mixing process. The authors of numerous publications point out that the optimization of these parameters allows you to achieve a more uniform distribution of the constituent components of the mixture and ensure the necessary homogeneity of the finished concrete. Using modern methods of numerical modeling, researchers were able to prove that certain combinations of design solutions increase the efficiency of the mixer by 10-15% [2].

Particular attention is also paid to the study of the physical and mechanical properties of concrete mixtures, which affect the nature of their movement during the rotation of the drum [3]. A number of publications demonstrate that changes in the viscosity, density and other rheological properties of the concrete mixture can significantly affect the efficiency of the mixing process [4]. Separate studies analyze the effect of temperature, degree of humidity and exposure time of a mixture on its behavior during mixing. Through computer simulations and experimental studies, it has been found that the unevenness of mixing in the initial stages of the process is often associated with the adhesion of cement particles and inert materials due to the incorrect choice of rotation parameters and speeds [5].

**3. Purpose of the work.** The purpose of this article is to conduct a comparative evaluation of the various mathematical models applied to the concrete mix mixing process in a gravity concrete mixer, in order to identify the models that provide the greatest accuracy, efficiency and compliance with production conditions.

**4. Discussion of research results.** The mathematical description of the physical model of a gravitational concrete mixer (fig. 1) is based on a set of equations describing the dynamics of mixing a concrete mixture under the influence of gravitational and centrifugal forces, friction between the particles of the mixture, as well as the effect of frictional forces on the walls of the drum. The main goal of the physical model is to reproduce the mixing process in a mathematical format, taking into account the influence of geometric and kinematic parameters of the concrete mixer.

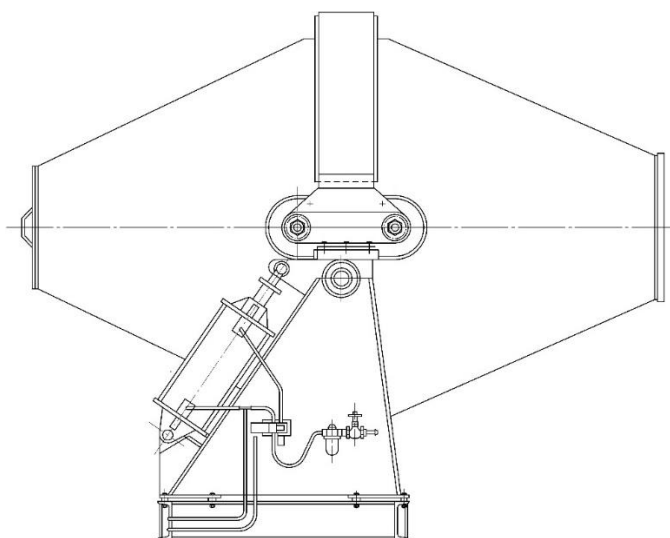


Fig. 1. Gravity Concrete Mixer

The basis of mathematical modeling is the description of the movement of aggregate solids in a viscous liquid, which consists of cement mortar and small particles. For this, the Navier-Stokes



equations are used, describing the behavior of a viscous liquid under conditions of dynamic mixing [6]. The Navier-Stokes equation has the form:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g}, \quad (1)$$

where:  $\rho$  — liquid density;  $\vec{v}$  — velocity vector;  $p$  — pressure;  $\mu$  — dynamic viscosity coefficient;  $\vec{g}$  — gravitational acceleration vector.

These equations take into account internal forces, such as pressure and viscosity, as well as external forces, including gravity. The equations are used to describe the behavior of a cement mortar that interacts with solid particles.

The movement of solid particles in a concrete mixer is described by discrete element methods (DEM). Each particle is modeled separately, taking into account its mass, shape and interaction with other particles and drum walls [7]. The equation of motion of a particle is determined by Newton's second law:

$$m_i \frac{d^2 \vec{x}_i}{dt^2} = \sum \vec{F}_{contact} + m_i \vec{g} + \vec{F}_{viscosity}, \quad (2)$$

where:  $m_i$  — Mass of the  $i$ -th particle;  $\vec{x}_i$  — particle position;  $\vec{F}_{contact}$  — the total force of contact with other particles and the surface of the drum;  $\vec{F}_{viscosity}$  — liquid interaction force.

Contact forces are determined based on models of elastic and plastic deformations, as well as friction coefficients. The viscosity force depends on the relative velocity between the particle and the surrounding liquid and takes into account the effect of the viscosity of the cement mortar.

One of the key factors affecting the mixing process is the speed of rotation of the drum. It determines what forces dominate during mixing: at low speeds, the mixture is predominantly exposed to gravity, which leads to mixing due to the falling particles. As the speed increases, centrifugal forces begin to dominate, creating the effect of particles "sticking" to the walls of the drum. For effective mixing, it is important to find a balance between these two modes, which is determined by the critical rotation speed [8]. The critical velocity is calculated using the formula:

$$\omega_{cr} = \sqrt{\frac{g}{R}}, \quad (3)$$

where:  $\omega_{cr}$  — critical angular velocity;  $g$  — acceleration of free fall;  $R$  — drum radius.

When this speed is exceeded, centrifugal forces begin to prevail over gravitational ones, which reduces the mixing efficiency.

An important parameter in the model is also the mixing time. It determines the degree of homogeneity of the concrete mixture and depends on the dynamic characteristics of the system. To optimize the process, it is necessary to establish a relationship between the mixing time and the homogeneity indicators. This dependence can be described using the time-dependent function of distributing particles according to their position and velocity:

$$C(t) = C_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (4)$$

where:  $C(t)$  — concentration of particles in a certain volume at a point in time  $t$ ;  $C_0$  — initial concentration;  $\tau$  — characteristic mixing time.

The value  $\tau$  depends on the geometry of the drum, the viscosity of the cement mortar and the properties of the aggregate.

Another important factor is the coefficient of friction between the mixture particles and the walls of the drum, which affects energy loss and process efficiency. This ratio depends on the material of the drum walls and the characteristics of the mixture, such as moisture and particle size. Determining the coefficient of friction is an important task that affects the accuracy of the model.

The total energy expended in the mixing process can be defined as the sum of the kinetic energy of the particles, the energy of strain during collisions, and the energy loss due to friction [9]. The mathematical expression of the energy balance can be written in the form:

$$E_{tot} = \sum \left( \frac{1}{2} m_i v_i^2 \right) + \sum E_{str} + E_{friction}, \quad (5)$$

where:  $E_{tot}$  — total energy of the system;  $v_i$  — velocity of the  $i$ -th particle;  $E_{str}$  — strain energy on contact;  $E_{friction}$  — energy lost due to friction.

Energy balance analysis helps to optimize the mixing process, reducing unnecessary energy loss and improving the homogeneity of the mixture.

The blades of the concrete mixer play a critical role in the mixing process, affecting the trajectory of the particles of the mixture, their speed and the forces acting on them. The mathematical description of this effect in the gravity concrete mixer model takes into account the geometric parameters of the blades, such as their angle of inclination, number, placement, and interaction with the components of the concrete mix. Each of these factors affects the distribution of forces in the system and the efficiency of mixing [10].

At a certain angle of inclination, the blades direct the mixture up and to the side, creating an effective distribution of components in the drum. The optimal angle of inclination depends on factors such as the speed of rotation of the drum, the viscosity and density of the mixture. Mathematical modeling of the effect of the angle of inclination can be done using equations that describe the direction and magnitude of the forces acting on a particle when it comes into contact with the blade. The components of the gravitational force that is split into components along and perpendicular to the surface of the blade are taken into account:

$$F_g = mg \sin(\alpha) \quad \text{and} \quad F_n = mg \cos(\alpha), \quad (6)$$

where:  $F_g$  — component of the gravitational force that contributes to the movement of the particle along the blade;  $F_n$  — a normal component that presses the particle to the surface of the blade;  $m$  — particle mass;  $g$  — acceleration of free fall;  $\alpha$  — blade inclination angle.

These forces determine how fast and in what direction the particles will move when they come into contact with the blade. Increasing the angle of inclination results in greater particle lift, but at the same time can reduce mixing efficiency due to less interaction between particles.

The number of blades in a concrete mixer also affects the mixing process. With more blades, the mixture is more likely to be picked up and mixed, which contributes to the homogeneity of the mixture. However, an excessive number of blades can create a stagnation zone or, conversely, overload the system, which increases the resistance to the movement of the mixture and energy expenditure. The frequency of contact determines the number of mechanical pulses that particles receive in a given time and affects the kinetic energy they gain. The total amount of mechanical work performed by the blades depends on the total mass of the mixture and the geometry of the system.

An important aspect of the model is the gravity of the mixture on the blades, which puts a load on the concrete mixer and affects the mixing efficiency.

$$F_g = mg, \quad (7)$$

where:  $m$  — mass of the mixture acting on a specific shoulder blade;  $g$  — acceleration of free fall.

Gravity affects the mechanical work that the blades must do to lift and move the mixture. This load can contribute to intense mixing if its distribution is optimal, or cause significant energy

losses in the event of an uneven load. Gravity also determines the maximum mass of the mixture that the blades can move efficiently without overloading the system.

The frictional force between the mixture particles and the blades counteracts the movement of particles along the surface of the blades and can both promote mixing and inhibit the process, depending on its magnitude. The frictional force is described by the equation:

$$F_{friction} = \mu F_n, \quad (8)$$

where:  $\mu$  — coefficient of friction between the particles of the mixture and the material of the blades;  $F_n$  — normal force acting on a particle.

The amount of friction force depends on the material from which the blades are made and on the characteristics of the mixture, in particular its moisture content and graininess. A high coefficient of friction can lead to more efficient pick-up of particles by the blades, but also causes an increase in energy expenditure to overcome resistance.

To determine the total effect of the blades on mixing, all the forces mentioned in the context of the kinetic and potential energy of the system are taken into account. Each particle that moves in the concrete mixer interacts with the blades, gaining or losing energy, which allows you to build an equation of motion that takes into account the influence of all the forces acting [11]. To describe the change in the velocity of a particle during contact with a blade:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = F_g + F_{friction} - F_{inertia}, \quad (9)$$

where:  $\vec{v}$  — particle velocity;  $F_{inertia}$  — the force of inertia resulting from the rotation of the drum.

This equation allows you to determine how the kinetic energy of a particle changes and how it contributes to the mixing process.

The overall mixing efficiency depends on the correct combination of the angle of inclination, the number of blades and the material from which they are made. If these parameters are optimally chosen, then the interaction between the particles and the blades leads to an even distribution of the components of the mixture, minimal energy consumption and high homogeneity of the finished concrete. Instead, incorrect parameters can cause the effect of "dead zones", where the mixture is practically not mixed, or overloading of individual blades, which causes wear and loss of efficiency.

In mathematical models of the mixing process involving the blades, special coefficients are often introduced that describe the influence of the geometric and dynamic characteristics of the blades on the mixing efficiency. The efficiency factor of the blades reflects how efficiently the blades carry and mix the mixture particles in the concrete mixer drum.

The coefficient  $k_{bl}$  can be expressed in the form of an empirical formula that includes parameters:

$$k_{bl} = f(\alpha, n, \mu, v), \quad (10)$$

where:  $\alpha$  — angle of inclination of the blades;  $n$  — number of blades in the drum;  $\mu$  — Coefficient of friction between the blades and particles of the mixture;  $v$  — drum rotation speed.

The rheology of concrete during mixing in a gravity concrete mixer is an important aspect that determines the characteristics and quality of the resulting concrete mixture. It describes how the concrete mixture reacts to the forces applied to it, including shear and gravitational, during the rotation of the concrete mixer drum. The main parameters affecting the rheological properties of a mixture include viscosity, plasticity, particle structure, their interconnection, and the influence of various physical factors. These characteristics can be described using rheological models such as Bingham's model, Newton's model, and more complex nonlinear models.

One of the most common models used to describe the rheological properties of a concrete mix is the Bingham model. It defines concrete as a pseudoplastic liquid that behaves like a solid at low stress values and goes into a fluid state only after a certain threshold shear stress is reached [12]. In mathematical form, this is expressed in terms of the equation:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}, \quad (11)$$

where:  $\tau$  — shear stress;  $\tau_0$  — threshold shear stress;  $\eta$  — concrete mix viscosity;  $\dot{\gamma}$  — shear speed.

This equation shows that the mixture only begins to flow when the applied stress exceeds the value of  $\tau_0$ . In the context of a gravity concrete mixer, Bingham's model describes how the blades and walls of the drum create shear stresses sufficient to bring the mixture into a fluid state. The values  $\tau_0$  and  $\eta$  depend on the composition of concrete, water-cement ratio, aggregate granularity and temperature.

The viscosity of a concrete mixture is an important rheological parameter that determines its yield resistance. In a gravity concrete mixer, viscosity affects how easily the cement and aggregate particles move relative to each other under the forces created by the blades. The toughness of concrete can be thought of as a function of the water-cement ratio, where more water reduces the viscosity and improves the fluidity of the mixture, but can reduce its strength after hardening. On the other hand, a decrease in the water-cement ratio increases the viscosity, complicates the mixing process and can lead to uneven particle distribution. In rheological models, this is reflected as the dependence of viscosity on the concentration of solid particles in the liquid phase:

$$\eta = \eta_0(1 + k\phi)^n, \quad (12)$$

where:  $\eta_0$  — viscosity of pure liquid (water);  $k$  and  $n$  — constants depending on the type and distribution of particles;  $\phi$  — volume fraction of solid particles in the concrete mixture.

The interaction between particles in a concrete mixture plays a key role in its rheological properties. Cement and aggregate particles form a complex network of bonds and structural interactions that determine how the mixture reacts to mechanical stress. The shear stresses created by the blades can destroy these structures, reducing viscosity and improving fluidity (rheological rarefaction). However, if the stress decreases, the structure can recover and the viscosity increases again. This effect is called thixotropy and can be described mathematically through changes in viscosity over time:

$$\eta(t) = \eta_0(1 + \theta \exp(-t / \lambda)), \quad (13)$$

where:  $\eta(t)$  — viscosity at a point in time  $t$ ;  $\theta$  — thixotropy coefficient;  $\lambda$  — characteristic relaxation time of the structure.

To describe the plastic deformation of the mixture, equations are used that take into account the elastic and viscous components of the reaction of the material. The viscoelastic model of concrete includes both instantaneous and slow reaction of the mixture to the applied stress. This is especially important in the context of a gravity concrete mixer, where the applied forces can change over time due to the rotational motion of the drum. Viscoelastic equations have the form:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (14)$$

where  $\sigma(t)$  — tension;  $E$  — modulus of elasticity;  $\varepsilon(t)$  — deformation;  $\eta$  — viscosity.

This model describes how a mixture accumulates stress when deformed and how quickly it returns to its original state after stress is relieved.

Another important factor in the rheological description of concrete is the distribution of particles of different sizes in the mixture. Large aggregates can create additional resistance to stirring, while small particles fill gaps and facilitate fluidity. This equation allows you to accurately estimate how different particle sizes and shapes affect the rheological properties of the mixture:

$$\eta = \int_0^\infty f(r)\eta_r dr, \quad (15)$$

where:  $f(r)$  — radius distribution function of particles  $r$ ;  $\eta_r$  — viscosity corresponding to radius particles  $r$ .

The analysis of existing approaches shows that mathematical modeling of the movement of the concrete mixture allows for a deeper understanding of the dynamics of mixing, especially taking into account the influence of gravitational and centrifugal forces, as well as the characteristics of particles. The complexity of the interaction of components in the mixing process necessitates the use of both classical hydrodynamic models and the latest methods of numerical modeling, which describe physical and mechanical processes with high accuracy.

An in-depth study of the effect of drum rotation speed on mixing efficiency allows us to understand how to achieve an optimal balance between gravitational and centrifugal forces acting on particles. Critical rotational speed analysis reveals the key points at which the mixing process switches from one mode to another. At the same time, much attention is paid to the geometric characteristics of the drum and blades, because their design features can significantly improve or, conversely, worsen mixing.

Thus, the presented material reflects the current state of research in the field of mathematical modeling of the mixing process in gravity concrete mixers. Although significant progress has been made in understanding the physical processes that occur during mixing, the question of choosing the best methods and approaches for practical application remains relevant. Further improvement of models that take into account the interaction of geometric and rheological factors is a promising direction for increasing the efficiency of equipment and improving the quality of concrete mixtures.

**5. Conclusions.** In the process of studying mathematical models of the movement of the concrete mixture in a gravity concrete mixer, it was found that effective mixing depends on a number of key factors, including the geometric parameters of the working body, the speed of rotation of the drum, the rheological properties of the mixture and the interaction between the particles. Optimization of these parameters can significantly improve the uniformity and quality of finished concrete, while reducing energy costs. The use of modern methods of numerical modeling allows you to describe physical processes with high accuracy and offer design solutions to improve the efficiency of equipment.

The development and improvement of mathematical models of the gravity concrete mixer is of great importance for improving the quality and efficiency of construction work. Further research should be aimed at creating complex models that take into account the influence of various factors and allow predicting the behavior of the concrete mixture under different mixing conditions. The use of these models in practice will contribute to the development of innovative mixing technologies that will meet modern construction requirements for energy efficiency, environmental friendliness and high quality of building materials.

## References:

1. Maoqiang Jiang, Yongzhi Zhao, Gesi Liu, Jinyang Zheng (2011). Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer. *Particuology*, 3 (9), pp 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.06.008>.
2. Nazarenko Ivan, Klymenko Mykola (2015). Evaluation of the energy balance and workflow criteria of the “drum mixer-concrete mixture” system. *Mining, Construction and Reclamation Machinery*, 85, pp. 59-65.
3. Nazarenko I., Klymenko M., Svidersky A., Pechersky V. (2017). Definition of rational parameters of drum concrete mixers. *GBDMM*, 90, 67-72.
4. Serhii Burlaka, Ihor Kupchuk, Serhii Shapovaliuik, Mykola Chernysh (2023). Analysis of the influence of the geometry of the blade mixer on the turbulence and intensity of liquid mixing. *Machinery energetics transport of agribusiness*, 2 (121), pp 16-22. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-2.
5. Yu Liu, Marcial Gonzalez, Carl Wassgren (2017). Modeling Granular Material Blending in a Rotating Drum using a Finite Element Method and Advection-Diffusion Equation Multi-Scale Model. *AIChE Journal*, 9 (64).

6. Yong Yuan, Xiaoyun Wang, Xi Chen, Peng Xiao, Eduardus Koenders, Ying Dai (2023). Mathematical models of apparent viscosity as a function of water–cement/binder ratio and superplasticizer in cement pastes. *Scientific Reports*, 13, 22301. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48748-4>.
7. Hamed Hoorijani, Behrad Esgandari, Reza Zarghami, Rahmat Sotudeh-Gharebagh, Navid Mostoufi (2023). Predictive modeling of mixing time for super-ellipsoid particles in a four-bladed mixer: A DEM-based approach. *Powder Technology* 430. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119009>.
8. Holub G., Achkevych O. (2017). Optimization of the angular velocity of drum-type mixers. *Bulletin of ZhNAEU*, No. 1 (58), p 194-202.
9. Nazarenko Ivan, Klymenko Mykola (2020). Application of general energy assessment criteria for preparing building mixtures. *KHNADU Bulletin*, 2 (88), pp 37-42. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.37.
10. Jian-Ping Pan, Ting-Jie Wang, Jun-Jie Yao, Yong Jin (2006). Granule transport and mean residence time in horizontal drum with inclined flights. *Powder Technology*, 162, pp 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.12.004>.
11. Rudyk Rostyslav, Virchenko Viktor, Salnikov Roman, Bidanets Serhii (2024). The effect of the blades on mixing the concrete mixture. *Materials of the 76th Scientific Conference of Professors, Teachers, Researchers, Postgraduate Students and University Students, Poltava*, pp. 270-271.
12. Ahmet Bilgil (2012). Estimation of slump value and Bingham parameters of fresh concrete mixture composition with artificial neural network modelling. *Scientific Research and Essays*, 5(8), pp. 1753-1765. DOI: 10.5897/SRE10.415.

UDC69.00.25

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0410>**Victor Nechiporuk,**

PhD student,

Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture,  
ave. Air Force of Ukraine, 31, Kyiv, UkraineORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8091-2420>E-mail: [nechiporuk.vg@knuba.edu.ua](mailto:nechiporuk.vg@knuba.edu.ua)

## RESEARCH ON THE PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF ROAD EQUIPMENT FAILURES

**Abstract.** *The parameters and characteristics of failures of road equipment for road construction are investigated. Attention is paid to the main types of distribution of equipment operation time to failure on the basis of exponential, Weibull, gamma, normal and logarithmically normal. Thus, the logarithmic normal distribution is used when the development of the process leading to failure can be represented as the product of successive independent random variables (for example, crack growth). that the uptime and useful life of the technique depend on a large number of factors, some of which are beyond control and others are established with a certain degree of uncertainty. The systems of machine maintenance and the laws of distribution of operating time for failure and the duration of failure elimination are considered. The influence of parameters on ensuring the effective use of equipment in the formation of a construction project is determined.*

**Keywords:** *failure, parameters and characteristics, types of wear, distribution laws, maintenance, mathematical expectation.*

**1. Introduction.** Modern requirements of the construction industry for road equipment provide for the minimization of energy consumption with the implementation of high quality of the technological process. One of the directions for solving these problems is the trouble-free operation of prefabricated units and machine parts as a whole. At the same time, it is necessary to take into account the implementation of the technological process in relation to the environment, to identify the reasons for the gradual change in the technical characteristics of the machine as a result of its operation. Situation is complicated by the fact that the uptime, operating life and shelf life of the machine depend on a large number of factors, some of which are beyond control, while others are set with a certain degree of uncertainty. Therefore, the consideration of the machine maintenance system and the laws of the distribution of operating time per failure and the duration of elimination of failures is an urgent task.

**2. Analysis of previous studies.** The reliability of road equipment is the main factor in ensuring the minimization of energy costs with the implementation of high quality of the technological process. A number of works are devoted to the study of reliability. Thus, the work[1] highlights the issues of ensuring the reliability of machines during design, manufacture, operation and repair. An interrelated set of issues of friction and wear, causes of changes in the technical condition of machines and the physics of failures is considered. reliability theories. The work[4] reveals methods for improving the reliability and durability of parts and assemblies of light industry machines. The works[5,6] provide the justification of engineering solutions and the methodology of the system approach and scientific research, including data for possible use in the study of the reliability of systems. In the works[7,8] the main attention is paid to the mathematical apparatus for assessing the indicators of reliability of agricultural machinery, the data of probabilities and mathematical statistics are given. The paper[9] highlights the issues of ensuring the reliability of machines and the role of technical service in ensuring the highly efficient functioning of the technological process of livestock production. In the work [10] for the formation of optimal strategies for managing production stocks of an enterprise, the problems of building stochastic modeling in the management of production stocks are analyzed. The main parameters in this work are investigated precisely on the main theoretical provisions of the cited works for specific characteristics of possible failures of parts and

assembly units of road machines and equipment, which will be the initial information for the development of a program and algorithms for the effective use of equipment in a certain technological process of road construction.

**3. Purpose and objectives of the study.** The purpose of the study is to study the parameters and characteristics of failures of road equipment for road construction. To achieve the goal, the following tasks are solved:

- assessment of the technical condition of machines and mechanisms, based on determining the degree of wear and tear of machines;
- research and determination of parameters and characteristics of failures of road equipment.

#### **4. Presentation of the main material.**

##### **4.1. Assessment of the technical condition of machines and mechanisms, based on determining the degree of wear and tear of machines.**

The initial stage in determining the efficiency of the machine operation is the analysis of the technical condition and the degree of use of the machines in the previous period. Assessment of the technical condition of machines and mechanisms is based on determining the degree of wear and tear of machines (Fig. 1). Depending on the degree of wear of individual parts of prefabricated units, machine assemblies, their possible failures are determined, the expediency of the cost of their repair in order to restore the functions of operability is assessed.

Using the method of expert assessments of the technical condition of machines and equipment, the coefficient of real physical wear is defined as the average value of wear of the most important parts, weighted by their share in the total or renewable cost of the machine. The failure flow is understood as a sequence of failures that occur one after another during the operation of machines [1]. The failures of assembly units or parts are random variables, each of them can take only one possible value with a certain probability, that is, they are discrete quantities. Like any discrete quantity, the number of failures has its own numerical values, which are called the numerical characteristics of a random variable. These include mathematical expectation, which is approximately equal to the mean value of failures, variance, mean square deviation, coefficient of variation, and others.

##### **4.2. Study and determination of parameters and characteristics of failures of road equipment.**

The failure flow parameter  $\omega(t)$  is the main indicator of the reliability of the object and is the ratio of the average number of failures of the restored object for its arbitrarily small operating time to the value of this operating time and is determined through the characteristic of the failure flow based on the equation:

$$\omega(t) = \frac{dH(t)}{dt}, \quad (1)$$

where  $H(t)$  is a characteristic of the failure flow, which is a mathematical expectation of the number of failures  $r(t)$  over time  $t$ :  $H(t) = M(r(t))$  [1].

Then the failover flow parameter

$$\omega(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M[r(t + \Delta t)] - M[r(t)]}{\Delta t}, \quad (2)$$

where  $\Delta t$  is a sufficiently small time interval.

In terms of its physical content, the failure flow parameter  $\omega$  is the rate of occurrence of failures, i.e. it is determined by the number of failures per unit of time or operating time.

When operating machines after some initial operating time, the failure flow parameter is constant  $\omega(t) = \omega = \text{const}$  [2].

The mathematical expectation of the number of failures gives much less information about failures than the law of their distribution. To determine the law of distribution of failures of machines, let's consider the probability of trouble-free operation – "the probability that within the operating time the failure of an object will not occur" [1] and represents an unconditional probability



that the failure will not occur in the time interval from 0 to  $t$ , but will occur in the time interval from  $t$  to  $\infty$ :

$$P(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt . \tag{3}$$

The probability of failure is determined by the formula:  $Q(t)=1-P(t)$ , and the curve of the function is a mirror image of the fault-free probability curve.

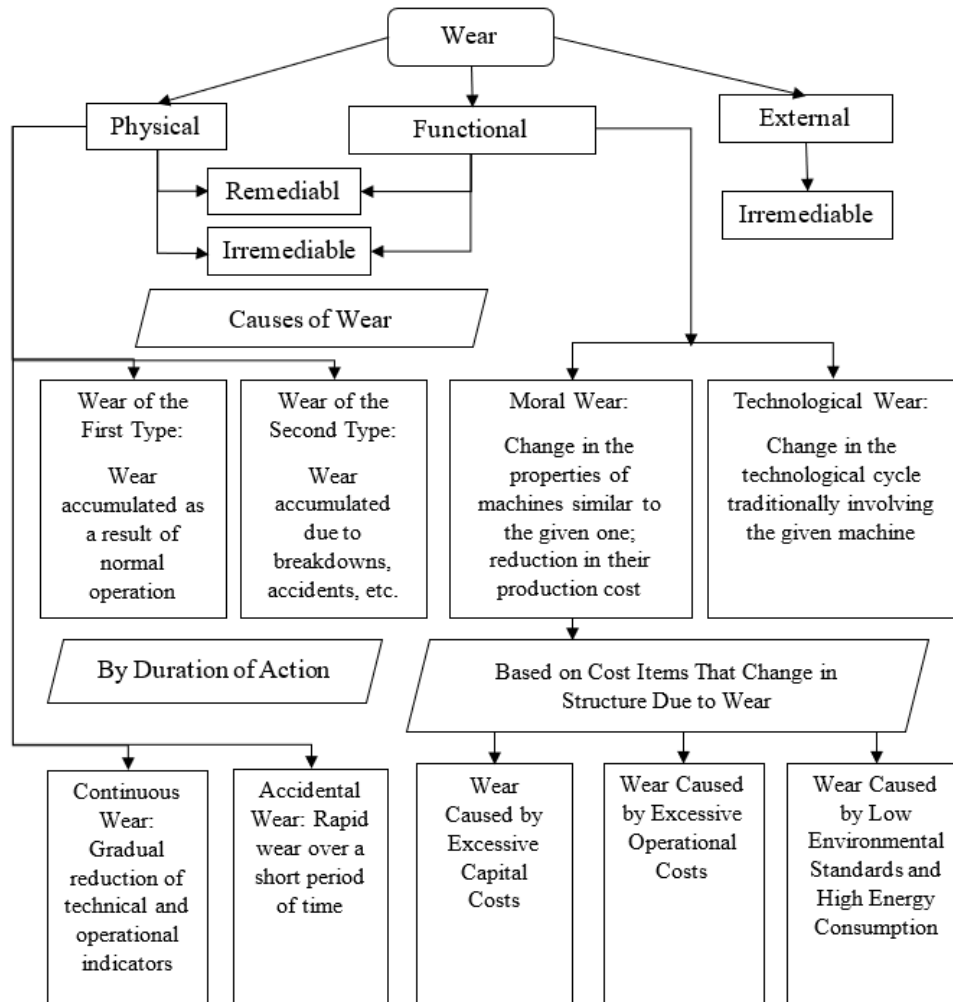


Fig. 1. Types of wear and tear

Random time intervals between events in the requirement stream can be subject to different distribution laws. The most acceptable distributions, as shown by a number of works on the theory of mass service [1,2], are the Poisson distribution; Exponential; Weibull; gamma distribution; logarithmic; normal;

The exponential time distribution between failures is asymptotic when fault flows overlap (combine) and when random rarefaction of the failure flow occurs.

The Weibull distribution is one of the three asymptotic distributions of extreme parameter values. It is used to justify the failure model. The gamma distribution is a convolution of exponential distributions, and it is used as a model of product failures with margin. The normal distribution is used when the runtime to failure of the product can be represented as the sum of a sufficiently large number of uniformly distributed terms. when the development of a process leading to failure can be represented as the product of successive independent random variables. The Poisson flow is characterized by the fact that the probability of receipt in the time period  $t$  is equal to  $k$  requirements,

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k} \exp(-\lambda t), \quad (4)$$

where  $\lambda$  is the intensity of the failure flow.

As it is known [1,5], the simplest flow of requirements is characterized by the following properties: stationarity, ordinariness and absence of consequences. In this case, the flow is stationary within the operation of construction machines, is considered ordinary and has no consequence (failures of different machines occur independently of each other). If the failure flow of a fixed number of recoverable objects is ordinary and has no aftereffect, then the failure flow parameter and the failure rate coincide, i.e.  $\omega(t)=\lambda(t)$ .

It is generally accepted [1] that for the simplest flow with intensity  $\lambda$ , the interval  $t$  between neighboring events has the so-called exponential distribution with density  $f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$

To analytically determine the intensity of failures, the formula [1] is used:

$$\lambda(t) = f(t)/P(t), \quad (5)$$

where  $f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$  is the probability density function of the reliability indicator under the exponential distribution law;  $P(t)=e^{-\lambda t}$  is the probability of trouble-free operation under the exponential law.

Substituting the values  $f(t)$  and  $P(t)$  into formula (5), we get  $\lambda=\text{const}$ , which characterizes the exponential law of probability distribution.

Time between failures is a mathematical expectation of an object's operating time between failures and shows what MTBF occurs on average per failure. Sometimes the term "average uptime" is used [2]:

$$t_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (6)$$

With the exponential probability distribution law, the statistical estimation of the average uptime is characterized by the average value of the failure intensity  $\lambda$ , i.e.

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (7)$$

But, due to the fact that the processes of wear and tear and destruction from fatigue are diverse due to the influence of various factors, a generalization of any law is unlikely for different details. Therefore, since, depending on the type of product and the nature of failures, the distribution of the resource can be described by different laws, for each specific case, the justification of the chosen distribution law is checked experimentally [5,6].

The probability of trouble-free operation of the machine over time ( $t_p+t$ ), according to the probability multiplication theorem, is:

$$P(t_p + t) = P(t_p) \cdot P(t; t_p), \quad (8)$$

where  $P(t_p)$  is the probability of trouble-free operation of the machine during the time  $t_p$ ;  $P(t; t_p)$  is the probability of failure-free

The operation of the machine during the time of the TABS, which is determined provided that during the TP time the machine did not fail.

Then, from the expression (8) we have:

$$P(t; t_p) = \frac{P(t_p + t)}{P(t_p)}. \quad (9)$$

In the case when the machine has worked flawlessly for some time  $t_p$ , the indicator is the average uptime  $T_o(t_p)$  characterizes the average technical resource of the machine that remains. Given that the average uptime

$$T_o = \int_0^{\infty} P(t)dt, \tag{10}$$

Get:

$$T_o(t_p) = \frac{1}{P(t_p)} \int_0^{\infty} P(t_p + t)dt. \tag{11}$$

Based on the basic law of reliability, given (11), we have:

$$P(t_p) = \exp\left(-\int_0^{t_p} \omega(t)dt\right), \tag{12}$$

$$P(t_p + t) = \exp\left(-\int_0^{t_p+t} \omega(t)dt\right). \tag{13}$$

Further, taking into account (9), we get:

$$P(t; t_p) = \exp\left(-\int_{t_p}^{t_p+t} \omega(t)dt\right). \tag{14}$$

The required frequency of regulatory operations is determined from the equation  $P(t; t_p) = Pd$ , which, taking into account the expression (14), we will bring to the form:

$$\int_{t_p}^{t_p+t} \omega(t)dt = -\ln P_d. \tag{15}$$

Assuming that the parameter of the failure flow of the machine  $\omega(t) = \text{const}$ , i.e. does not change during the operating time, from the expression (15) we determine:

$$t = -\frac{1}{\omega(t)} \ln P_d. \tag{16}$$

If we assume that the parameter of the failure flow of machines during a certain period  $t$  can be approximated by a linear function of the form  $\omega(t) = a + b(t)$ , then substituting this function in (15) and integrating, we get a quadratic equation, the solution of which will be:

$$t = \frac{(a + bt_p) + \sqrt{(a + bt_p)^2 - 2b \ln P_d}}{b}.$$

The maximum resource of the machine or prefabricated unit will be provided that they are subject to a specified technical inspection. The optimal frequency of these operations can be determined based on the analysis of the service cost function.

Suppose that the machines have a constant failure rate. Then, to schedule the inspection operations, it is enough to determine the sequence of non-negative numbers  $t_k$  ( $k=0; \infty$ ), where  $t_0=0$ . At  $t_k=t_k$ , the maintenance plan is periodic with a period  $t$ , i.e. the machines are to be serviced every

$t$  hours, provided that there have been no failures. If the machine fails between  $k$  and  $k+1$  maintenance, then the costs will be equal to:

$$B = (k + 1)B_{\text{о6c}} + (t_{k+1} - t)B_{\text{в}}, \tag{17}$$

where  $B_{\text{о6c}} = B_{\text{ип}}t_{\text{о6c}}$  is the costs associated with the downtime of the machine for the serviced;  $B_{\text{в}} = B_{\text{ип}}t_{\text{п}}$  – costs associated with the elimination of machine failures, here  $S_{\text{пр}}$  is the cost of one hour of machine downtime;  $t_{\text{бс}}$ ,  $t_{\text{п}}$  – respectively, the average time spent on maintenance operations and troubleshooting due to untimely performance of these operations.

Then the average total costs will be the value:

$$B_{\text{с}} = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{t_k}^{t_{k+1}} [B_{\text{о6c}}(k + 1) + B_{\text{в}}(t_{k+1} - t)] dF(t), \tag{18}$$

where  $F(t)$  is a function of the machine uptime distribution.

Any schedule of maintenance operations that minimizes the function (18) will be optimal, from which their optimal frequency  $t$  is determined.

If the intensity of machine failures is not constant. but increases, then the frequency of maintenance of these machines should be reduced with an increase in operating time. Consider the case of carrying out such operations every  $t$  units of time or operating time. If the machine failed at the moment  $\tau$ ,  $kt \leq \tau \leq (k+1)t$ , then the average total costs will be:

$$B_{\text{с}} = \sum_{k=0}^{\infty} \int_{kt}^{(k+1)t} \left\{ \begin{array}{l} B_{\text{о6c}}(k + 1) + \\ B_{\text{в}}[(k + 1)t - \tau] \end{array} \right\} dF(t) + B_{\text{о6c}}. \tag{19}$$

Assuming that the uptime of the machine has an exponential distribution law, i.e.

$$F(t) = 1 - \exp(-\omega t), \tag{20}$$

where  $\omega = at^m$  is the failure flow parameter (here  $a$ ,  $m$  are constants).

The expression (19) of average costs will take the form:

$$B_{\text{с}} = \frac{B_{\text{о6c}} \exp(\omega t)}{1 - \exp(-\omega t)} + \frac{B_{\text{в}} t}{1 - \exp(-\omega t)} - \frac{B_{\text{в}}}{\omega} + B_{\text{о6c}}. \tag{21}$$

Differentiating (21) and equating the derivative to zero, we get an expression to determine the optimal period of maintenance operations, at which the total costs are minimized:

$$\exp(\omega t) - \omega t - \omega \frac{B_{\text{о6c}}}{B_{\text{в}}} - 1 = 0. \tag{22}$$

**5. Discussion of results.** The detected failures of assembly units or parts are random variables, each of them can take only one possible value with a certain probability, that is, they are discrete quantities. Like any discrete quantity, the number of failures has its own numerical values. It is determined that random time intervals between events in the flow of requirements can be subject to different distribution laws. From the analysis of various distribution laws, the Poisson distribution is investigated in the work. The maximum resource of the machine or prefabricated unit will be provided that they are subject to a specified technical inspection. The optimal frequency of these operations is determined on the basis of the analysis of the service cost function. Analytical dependencies have been obtained to determine the probability of trouble-free operation of the construction

machine during the established time of the technological operation and the optimal frequency of technological inspection operations of construction machines based on the analysis of the service cost function has been determined. The disadvantages of the studies carried out include the lack of numerical values of the failure intensity, which is supposed to be determined in further studies on the basis of the already collected material of the workflow of the equipment of concrete mixers and concrete pavers.

#### **Conclusions:**

1. The probability density function of the reliability indicator of the operating parameters of machines according to the exponential law of their distribution has been investigated.

2. Obtained analytical dependencies to determine the probability of trouble-free operation of road machines during the set time of the technological operation.

3. The optimal frequency of technological inspection of road machines is determined on the basis of the analysis of the service cost function.

#### **References:**

1. Kanarchuk V.E., Polyansky S.K., Dmitriev M.M. Reliability of machines: Textbook.– Kyiv: Lybid, 2003. – 424 p. (in Russian).
2. Grabar I. G. Fundamentals of machine reliability: manual: - Electron. text data. - Zhytomyr: ZHITI, 1998. - 298 p.
3. Dziuba L., Zyma Y., Lyutyi Y. Fundamentals of machine reliability. Lviv, "Logos", 2003. – 201 p. (in Russian).
4. Zenkin M.A., Pipa B.F. Methods for improving the reliability and durability of parts and assemblies of light industry machines: Textbook. – Kyiv: KNUDTD, 2004 -264 p.
5. Nagorny Y.P. Substantiation of engineering solutions. manual. - Kiev: Urozhay, 1994. - 216 p. (in Russian).
6. Kustovska O.V. Methodology of the System Approach and Scientific Research: Course of Lectures. Ternopil: Economic Thought, 2005. 124 p. (in Russian).
7. Chornovol M.I., Cherkun V.Yu., Aulin V.V. and others. Reliability of agricultural machinery: Textbook. – Kirovohrad: KOD LLC, 2010. – 320 p. (in Russian).
8. Grankin S.G., Malakhov V.S., Chornovol M.I. et al. ; Reliability of agricultural machinery – Kyiv: Urozhay, 1988.- 208 p.
9. Boltyanska N.I. Reliability of technological systems. Course of lectures. Melitopol: VPC "Lux". 2019. 168 p. (in Russian)
10. Izonin I. V., Lagotskyi T. Y. Problems of Stochastic Modeling Problems in Production Inventory Management. Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine: Information Technologies of the Industry. – 2012. – Vyp. 22.5. – P. 351–356.

УДК 62-4:658.5

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0411>**Микола Клименко,**

кандидат технічних наук,  
завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6166-8966>,  
E-mail: [klymenko.mo@knuba.edu.ua](mailto:klymenko.mo@knuba.edu.ua)

**Олександр Дьяченко,**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри машин і обладнання технологічних процесів  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8199-2504>  
E-mail: [diachenko.os@knuba.edu.ua](mailto:diachenko.os@knuba.edu.ua)

**Василь Марач,**

аспірант  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9457-6042>  
E-mail: [marach.vm@knuba.edu.ua](mailto:marach.vm@knuba.edu.ua)

## МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПРИ КОНТРОЛІ ПАРАМЕТРІВ З'ЄДНАНЬ МАШИН ПРОМИСЛОВОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

**АНОТАЦІЯ.** У статті розглянуто сучасні методи забезпечення якості при контролі параметрів з'єднань у машинобудуванні. Акцент зроблено на використанні методу Парето для визначення ключових дефектів, що найбільше впливають на якість продукції, та причинно-наслідкової діаграми Fishbone для ідентифікації кореневих причин проблем. Запропоновано інтегрований підхід, який включає аналітичні інструменти, вдосконалення технологічного контролю та підвищення кваліфікації персоналу. Зазначені методи дозволяють мінімізувати кількість дефектів, підвищити надійність продукції та оптимізувати виробничі процеси. Результати дослідження можуть бути використані для впровадження ефективних стратегій покращення якості у виробничих системах.

**Ключові слова:** методи забезпечення якості, параметри з'єднань, метод Парето, діаграма Fishbone, причинно-наслідковий аналіз, дефекти продукції, технологічний контроль, аналіз даних, підвищення надійності, удосконалення процесів, контроль якості, кореневі причини.

## QUALITY ASSURANCE METHODS FOR CONTROLLING THE PARAMETERS OF CONNECTIONS OF MACHINES IN THE BUILDING MATERIALS INDUSTRY

**ABSTRACT.** The article examines modern methods for ensuring quality in the control of connection parameters in mechanical engineering. Emphasis is placed on using the Pareto method to identify key defects that significantly affect product quality and the Fishbone cause-and-effect diagram to determine the root causes of issues. An integrated approach is proposed, including analytical tools, improved technological control, and personnel training. These methods enable minimizing defects, enhancing product reliability, and optimizing production processes. The research results can be utilized to implement effective quality improvement strategies in manufacturing systems.

**Keywords:** quality assurance methods, connection parameters, Pareto method, Fishbone diagram, cause-and-effect analysis, product defects, technological control, data analysis, reliability improvement, process enhancement, quality control, root causes.

### 1. Постановка проблеми. Забезпечення якості з'єднань є ключовим фактором у

багатьох галузях промисловості, зокрема в машинобудуванні, будівництві, авіакосмічній та енергетичній сферах. Надійність та довговічність з'єднань визначають загальну працездатність конструкцій і технологічних систем, а отже, їхній контроль та відповідність встановленим параметрам мають вирішальне значення. Зважаючи на постійне ускладнення конструкцій, застосування новітніх матеріалів і технологій виготовлення, питання контролю параметрів з'єднань набуває особливої актуальності.

Сучасні підходи до забезпечення якості з'єднань стикаються з низкою викликів. Серед них – висока вартість обладнання для контролю, обмеженість методів у виявленні дефектів, що виникають у складних умовах експлуатації, а також необхідність інтеграції методів контролю у виробничі процеси без їхнього значного ускладнення. В умовах підвищення вимог до надійності та довговічності виробів особливого значення набувають методи неруйнівного контролю, які дозволяють оцінювати параметри з'єднань без пошкодження виробів. Одночасно, використання інноваційних підходів, таких як застосування штучного інтелекту та автоматизованих систем, створює нові можливості для вдосконалення методів контролю.

Дослідження методів забезпечення якості при контролі параметрів з'єднань спрямоване на вирішення низки критичних завдань: підвищення точності контролю, зменшення витрат на обслуговування та усунення помилок людського фактору. Розробка нових методик контролю з використанням сучасних технологій дозволить підвищити ефективність виробничих процесів і забезпечити високу якість готової продукції. Крім того, такі дослідження сприятимуть оптимізації витрат ресурсів і покращенню екологічних показників промислових підприємств. Таким чином, наукове дослідження в цьому напрямі не лише задовольняє потреби сучасного виробництва, але й відкриває нові перспективи для подальшого розвитку технологій забезпечення якості

**2. Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Забезпечення якості при контролі параметрів з'єднань є одним із ключових напрямів сучасних наукових досліджень, спрямованих на підвищення надійності та ефективності конструкцій у різних галузях промисловості. У світовій науковій спільноті активно обговорюються методи вдосконалення якості виробів, зокрема через інтеграцію новітніх технологій у процеси контролю та оцінки.

Серед останніх досліджень важливими є роботи Madhu Puttegowda та Sharath Ballurpete Nagaraju [1], а також [2], присвячені впровадженню інтелектуальних систем в машинобудуванні. У цих роботах акцент зроблено на використанні штучного інтелекту та машинного навчання для аналізу параметрів з'єднань у режимі реального часу. Автори демонструють, що застосування таких підходів дозволяє значно знизити вплив людського фактора і підвищити точність контролю, особливо в умовах автоматизованого виробництва.

Дослідження Riveiro Belén і Mercedes Solla [3] розглядає неруйнівні методи контролю з'єднань, в тому числі із використанням лазерних технологій. Робота показала, що лазерний ультразвук дозволяє отримувати детальну інформацію про внутрішню структуру з'єднань без необхідності їх пошкодження. Це відкриває нові можливості для контролю складних конструкцій, наприклад, у авіаційній та космічній галузях.

Важливим внеском у цій сфері є дослідження Ronald Halmshaw [4], де проведено аналіз впливу технологічних параметрів процесів зварювання на якість з'єднань. Автором розроблено математичні моделі, що дозволяють прогнозувати формування дефектів залежно від температурного режиму та складу матеріалів. Це дослідження стало основою для вдосконалення процесів виготовлення зварних з'єднань у машинобудуванні.

Особливу увагу привертають дослідження, пов'язані з використанням автоматизованих систем для забезпечення якості. Робота Ramesh Kumrati та Skarka Wojciech [5] присвячена розробці автоматизованих комплексів неруйнівного контролю, які інтегруються у виробничі лінії. Автори підкреслюють, що такі системи не лише знижують час перевірки, але й підвищують економічну ефективність виробничих процесів.

Також варто зазначити внесок українських науковців у цю галузь. В дослідженнях Маєвського С.М. [6] розглядається специфіка контролю якості з'єднань у будівельній галузі.

Автор акцентує увагу на використанні комбінованих методів контролю, що поєднують візуальний огляд і ультразвуковий аналіз. Як випливає з низки інших досліджень [7-8], це дозволяє забезпечити точність перевірки великих з'єднань із мінімальними витратами.

У цілому, аналіз сучасних досліджень та публікацій свідчить про значний прогрес у розробці методів забезпечення якості при контролі параметрів з'єднань. Водночас залишається низка невирішених питань, пов'язаних із адаптацією новітніх технологій до конкретних виробничих умов, а також із підвищенням економічної доцільності використання складних технічних рішень. Це підтверджує необхідність подальших досліджень у цій сфері для вирішення актуальних задач сучасного виробництва.

**3. Мета роботи.** Розробка та вдосконалення методів забезпечення якості при контролі параметрів з'єднань, що забезпечують високу точність, надійність та ефективність оцінки технічних характеристик з'єднань для підвищення довговічності та безпечності конструкцій.

**4. Матеріали та методи.** В дослідженнях методів забезпечення якості при контролі параметрів з'єднань можна ефективно застосувати метод Парето та причинно-наслідкові діаграми для ідентифікації, аналізу та усунення основних проблем, що впливають на якість з'єднань.

Загально відомим і широко використовуваним методом в практиці управління якістю, який можна перенести на машинобудівну галузь у будівельній сфері є метод Парето, який базується на принципі Парето 80/20, що дозволяє визначити ключові фактори, які впливають на якість з'єднань, зокрема виявити найбільш критичні дефекти або технологічні параметри, що спричиняють основну частину проблем. Для застосування методу Парето в дослідженні необхідно:

- виконати збір даних та провести аналіз статистичних даних про дефекти з'єднань, таких як тріщини, пори, недостатнє проплавлення або відхилення геометричних розмірів, тощо;

- виконати класифікацію дефектів, згрупувавши дефекти за їхніми типами та частотою виникнення;

- побудувати діаграму Парето, створивши графік, який відобразить частку кожного виду дефектів у загальному об'ємі проблем. Це дозволить визначити дефекти, усунення яких матиме максимальний вплив на підвищення якості;

- здійснити пріоритетизацію рішень, спрямувавши зусилля на вдосконалення технологій або процесів, пов'язаних із найпоширенішими дефектами.

Іншим відомим методом є діаграма Fishbone, яка допомагає візуалізувати причинно-наслідкові зв'язки між проблемами якості з'єднань і їхніми потенційними причинами. Її використання включає:

- визначення основної проблеми, наприклад, незадовільна якість зварного шва;

- ідентифікація основних категорій причин, оскільки вони можуть охоплювати фактори, пов'язані з обладнанням (знос, налаштування), матеріалами (якість, несумісність), методиками (недоліки технології) та людським фактором (помилки оператора);

- власне побудова самої діаграми, вказавши для кожної категорії підпричини, які можуть спричинити основну проблему. Наприклад, для категорії "обладнання" це можуть бути недостатня потужність або неправильне калібрування, тощо.

- аналіз діаграми шляхом визначення основних причин проблеми, зосереджуючись на тих, які можна усунути найбільш ефективно.

Комбінування цих методів дозволяє системно аналізувати та оптимізувати технологічні процеси контролю параметрів з'єднань. При цьому, метод Парето допомагає визначити найбільш значущі дефекти, тоді як діаграма Fishbone сприятиме ідентифікації глибинних причин цих дефектів. Це, у свою чергу, дозволяє розробити практичні рекомендації для підвищення якості з'єднань і ефективності виробничих процесів.

**5. Результати.** Розберемо приклад застосування методів діаграми Парето та причинно-наслідкової діаграми Fishbone в машинобудуванні на прикладі заводу з виробництва коробок передач для автомобілів, на якому спостерігається висока частка браку,



що впливає на виробничі витрати та строки постачання. Застосуємо метод Парето для ідентифікації основних джерел проблем, таким чином, зможемо виявити ключові дефекти, які найбільше впливають на якість продукції, і визначити, на які етапи виробничого процесу слід спрямувати зусилля з оптимізації.

Припустимо, що протягом трьох місяців було зібрано інформацію про типи дефектів, їхню кількість та частку в загальному обсязі браку. Основними дефектами виявилися:

- невідповідність шліфування зубців (120 випадків)
- тріщини в корпусі (95 випадків)
- деформація валу (85 випадків)
- неправильна обробка посадочних місць (75 випадків)
- низька точність шліфування валу (60 випадків)
- відхилення у термообробці (50 випадків)
- несправності підшипників (45 випадків)
- інші дефекти (20 випадків).

Складаємо таблицю дефектів (табл.1).

Таблиця 1. Таблиця дефектів

Table 1. Defect table

Тип дефекту	Кількість випадків	Частка (%)	Кумулятивна частка (%)
Невідповідність шліфування зубців	120	22%	22%
Тріщини в корпусі	95	17%	39%
Деформація валу	85	15%	55%
Неправильна обробка посадочних місць	75	14%	68%
Низька точність шліфування валу	60	11%	79%
Відхилення у термообробці	50	9%	88%
Несправності підшипників	45	8%	96%
Інші дефекти	20	4%	100%
Разом	550	100%	

На основі зібраних даних будемо діаграму Парето (рисунок 1), розміщуючи на горизонтальній осі типи дефектів, а на вертикальних – їх кількість (ліва вісь) та кумулятивну частку (права вісь).

Аналіз отриманих даних показує, що чотири основні типи дефектів (невідповідність шліфування зубців, тріщини в корпусі, деформація валу та неправильна обробка посадочних місць) складають 69% від загальної кількості браку.

Отже, для усунення основних проблем мають бути розроблені наступні заходи:

1. для усунення невідповідності шліфування зубців – наприклад, вдосконалення системи калібрування верстатів та впровадження автоматичного моніторингу процесу;
2. для усунення тріщин в корпусі – виконані заходи з оптимізації технології лиття та посилення контролю якості сировини;
3. для усунення деформацій валу – здійснений перегляд параметрів термообробки, зокрема температурних режимів та тривалості нагрівання;
4. для усунення неправильної обробки посадочних місць – проведено навчання операторів щодо правильної налаштування обладнання та вдосконалення процесу поточного контролю.

Як показує практика застосування такого методу через півроку після впровадження заходів кількість дефектів зменшується на 65%, що дозволяє підприємству скоротити виробничі втрати на 30% та знизити витрати на виправлення браку.

Для доповнення аналізу на основі методу Парето гарні результати дає використання причинно-наслідкової діаграми Fishbone, яка застосовується для ідентифікації кореневих

причин основних дефектів, зокрема тих, які становлять найбільшу частку браку, в нашому випадку з прикладу: невідповідність шліфування зубців, тріщини в корпусі, деформація валу та неправильна обробка посадочних місць.

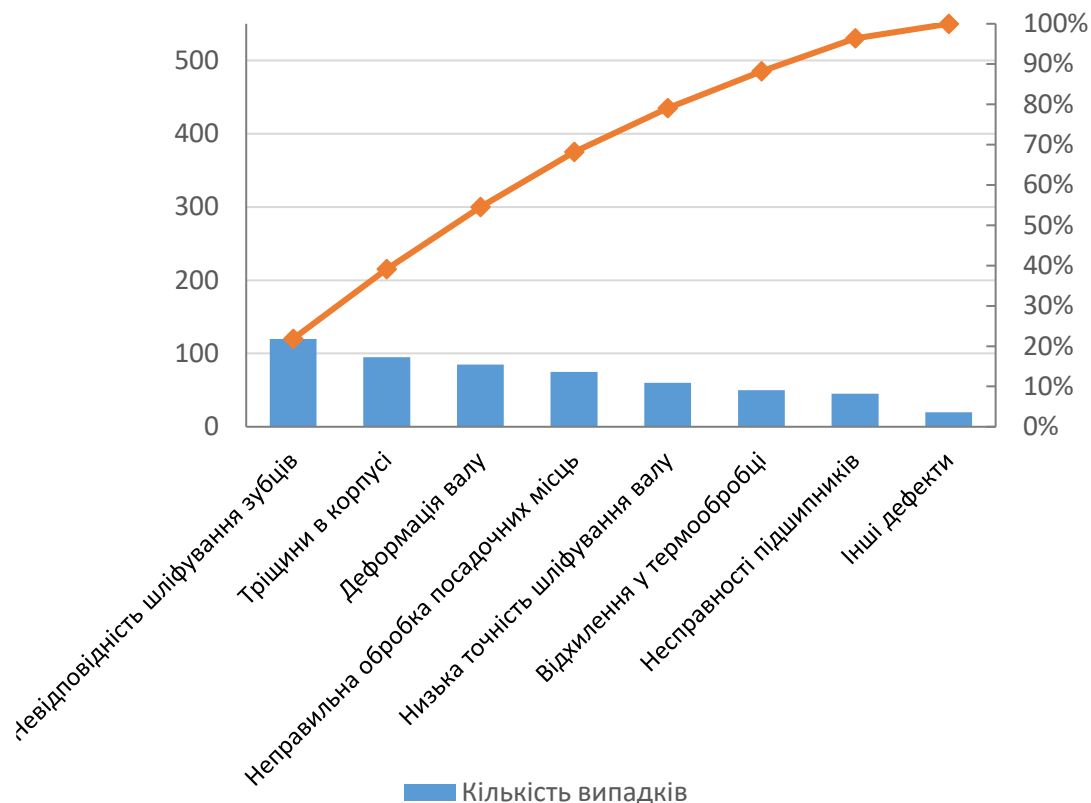


Рис. 1. Діаграма Парето  
Fig. 1. Pareto Diagram

Вибираємо основну проблему для наступного аналізу, а саме: "Невідповідність шліфування зубців" (22% всіх дефектів).

Визначимо основні причини, які поділяються на кілька категорій, типових для виробничих процесів. Згідно з методологією використання причинно-наслідкової діаграми Fishbone такими категоріями є:

- обладнання, яка включає технічний стан, налаштування верстатів, тощо;
- матеріали, що включає якість сировини, властивості заготовок, т.п.;
- методика, до якої відносять технологічні параметри обробки, дотримання стандартів, т.п.;
- людський фактор, в тому числі, кваліфікація персоналу, помилки операторів, тощо;
- середовище, включаючи умови роботи, температуру, вібрації, т.п.

На основі побудованої причинно-наслідкової діаграми Fishbone (рисунок 2) виявляються ключові кореневі причини. Наприклад:

- некоректне калібрування верстата (обладнання);
- недотримання стандартів шліфування (методика);
- помилки при налаштуванні обладнання (людський фактор).

Надалі для кожної ідентифікованої причини розробляються конкретні заходи, такі як:

- впровадження автоматизованої системи калібрування та моніторингу роботи верстатів;
- проведення навчань для операторів з акцентом на налаштування обладнання;
- розробка та впровадження жорсткішого регламенту контролю якості заготовок.

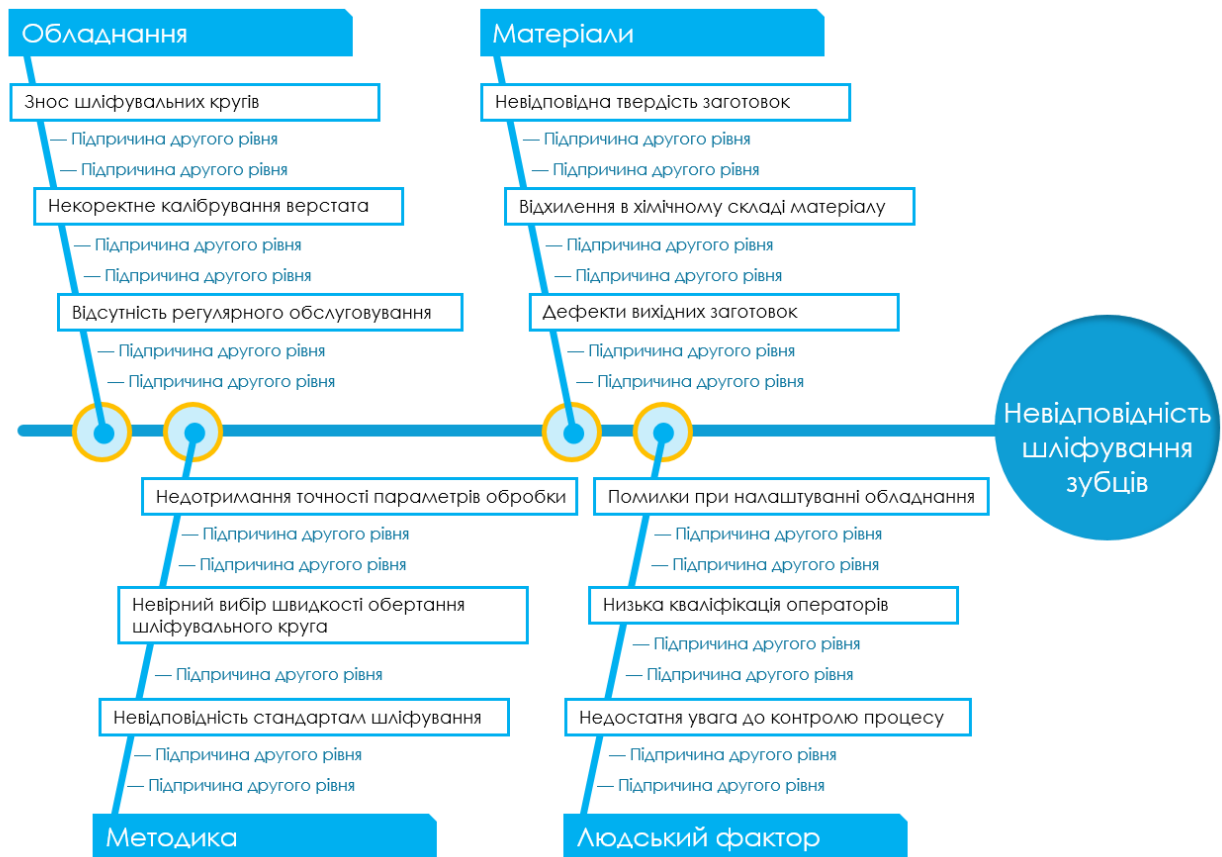


Рис. 2. Причинно-наслідкова діаграма Fishbone  
 Fig. 2. Cause-and-Effect Fishbone Diagram

**6. Висновки.** Методи забезпечення якості при контролі параметрів з'єднань повинні базуватися на інтегрованому підході, що включає застосування аналітичних інструментів і технологічних заходів. Методологія Парето дозволяє ідентифікувати найбільш значущі дефекти, забезпечуючи пріоритизацію ресурсів для їх усунення, що підвищує ефективність виробничих процесів. Застосування причинно-наслідкової діаграми Fishbone сприяє визначенню ключових факторів впливу, таких як стан виробничого обладнання, властивості матеріалів, параметри технологічного процесу, людський фактор та виробниче середовище. Комплексне впровадження зазначених методів у поєднанні з удосконаленням технологічного контролю та підвищенням кваліфікації персоналу забезпечує мінімізацію дефектів, підвищення надійності продукції та оптимізацію виробничих систем

**Список використаних джерел**

1. Madhu Puttegowda, Sharath Ballupete Nagaraju (2024). Artificial intelligence and machine learning in mechanical engineering: Current trends and future prospects, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 142, 109910.
2. Jenis, J., Ondriga, J., Hrcek, S., Brumercik, F., Cuchor, M., & Sadovsky, E. (2023). *Engineering Applications of Artificial Intelligence in Mechanical Design and Optimization*. *Machines*, 11(6), 577.
3. Riveiro, B., & Solla, M. (Eds.). (2016). *Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructure (Vol. 11)*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
4. Halmsaw, R. (1996). *Introduction to the non-destructive testing of welded joints*. Woodhead Publishing.
5. Kumpati, R., Skarka, W., & Ontipuli, S.K. (2021). Current Trends in Integration of Nondestructive Testing Methods for Engineered Materials Testing. *Sensors*, 21(18), 6175.
6. Маєвський С.М. (2011). Координатна реєстрація інформації в дефектоскопії / С.М. Маєвський, К. М. Серий. К.: Львів. 116 с.

7. R.Wang (2016). An Automated Sensing System for Steel Bridge Inspection Using GMR Sensor Array and Magnetic Wheels of Climbing Robot / R.Wang, Y.Kawamura// Hindawi Publishing Corporation, Journal of Sensors, 15 p.
8. Adhikari, R.s & Zhu, Z. & Moselhi, Osama & Bagchi, Ashutosh. (2013). Automated Bridge Condition Assessment with Hybrid Sensing // Conference: 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining; Held in conjunction with the 23rd World Mining Congress.

### References:

1. Madhu Puttegowda, Sharath Ballupete Nagaraju (2024). Artificial intelligence and machine learning in mechanical engineering: Current trends and future prospects, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume 142, 109910.
2. Jenis, J., Ondriga, J., Hreck, S., Brumerick, F., Cuchor, M., & Sadovsky, E. (2023). Engineering Applications of Artificial Intelligence in Mechanical Design and Optimization. *Machines*, 11(6), 577.
3. Riveiro, B., & Solla, M. (Eds.). (2016). Non-destructive techniques for the evaluation of structures and infrastructure (Vol. 11). Boca Raton, FL, USA: CRC Press.
4. Halmshaw, R. (1996). Introduction to the non-destructive testing of welded joints. Woodhead Publishing.
5. Kumpati, R., Skarka, W., & Ontipuli, S.K. (2021). Current Trends in Integration of Nondestructive Testing Methods for Engineered Materials Testing. *Sensors*, 21(18), 6175.
6. Mayevs'kyi S.M. (2011). Koordynatna reyestratsiya informatsiyi v defektoskopiyyi / S.M. Mayevs'kyi, K. M. Syeryy. K.: L'viv. 116 s..
7. R.Wang (2016). An Automated Sensing System for Steel Bridge Inspection Using GMR Sensor Array and Magnetic Wheels of Climbing Robot / R.Wang, Y.Kawamura// Hindawi Publishing Corporation, Journal of Sensors, 15 p.
8. Adhikari, R.s & Zhu, Z. & Moselhi, Osama & Bagchi, Ashutosh. (2013). Automated Bridge Condition Assessment with Hybrid Sensing // Conference: 30th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining; Held in conjunction with the 23rd World Mining Congress.

## Технологія захисту навколишнього середовища

УДК 628.4.03

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0412>**Ігор Сатін,**

кандидат технічних наук,  
доцент, кафедри Технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна,  
т.в.о. заступника директора Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»,  
вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, 03035, Україна,  
ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-2028-9791>  
E-mail: [satin@nikti.org.ua](mailto:satin@nikti.org.ua)

**Сергій Хитрук,**

науковий співробітник Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»,  
вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8536-6874>  
E-mail: [hytruk@nikti.org.ua](mailto:hytruk@nikti.org.ua)

**Олена Панченко,**

завідувач лабораторії Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»,  
вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035,  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3680-7036>  
E-mail: [panchenko@nikti.org.ua](mailto:panchenko@nikti.org.ua)

### ВИЗНАЧЕННЯ НОРМ НАДАННЯ ПОСЛУГ З ВИВЕЗЕННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ ВАРАСЬКОЇ МІСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ

**АНОТАЦІЯ.** *Вирішення проблеми управління побутовими відходами базується на визначенні кількості їх утворення. Причому важливо проводити дослідження як для міських, так і для сільських населених пунктів з різним ступенем охоплення населення централізованою системою збирання та вивезення побутових відходів для отримання більш достовірних результатів.*

*Метою роботи є удосконалення методологічних підходів до визначення норм надання послуг з вивезення побутових відходів у населених пунктах.*

*Із аналізу літературних даних встановлено, що відсутні достовірні дані про проведені натурні заміри та їх результати, відсутні єдині форми подання отриманих результатів, що унеможлиблює їх порівняння та проведення глибшого аналізу із виявлення залежності розрахованих норм накопичення до кількості населення та рівня охоплення централізованою системою збирання та вивезення побутових відходів у містах, територіальних громадах та селах.*

*У представлений роботі виконані натурні дослідження з визначення обсягів утворення побутових відходів від джерел їх утворення. Проведення натурних замірів відбувались на території Вараської міської територіальної громади.*

**Ключові слова:** *побутові відходи, змішані побутові відходи, норми надання послуг, норми утворення*

### DETERMINATION OF THE NORMS FOR THE TRANSPORTATION OF MUNICIPAL WASTE FOR VARAS CITY TERRITORIAL COMMUNITY SETTLEMENTS

**ABSTRACT.** *Solving the problem of municipal waste management is based on determining the amount of generated waste. It is important to conduct research for both urban and rural settlements with*

*different degrees of coverage of the population by a centralized system of collection and removal of household waste in order to obtain more reliable results.*

*The purpose of the work is to improve methodological approaches to determining the norms of providing services for the transportation of municipal waste in populated areas.*

*Analysis of literature data shows that there is no valid data on field measurements and their results, and there are no consistent forms of presentation of the obtained results. This makes it impossible to compare them and carry out a deeper analysis to identify the dependence of the calculated accumulation rates on the population and the level of coverage by the centralized collection system and transportation of municipal waste in cities, territorial communities and villages.*

*This article presents field studies performed to determine the volume of municipal waste generation from the sources of its generation. On-site measurements were carried out on the territory Varas city territorial community settlements.*

**Key words:** *municipal waste, mixed municipal waste, service provision norms, formation norms*

**1. Постановка завдання.** Однією з причин екологічно небезпечної ситуації, яка склалась в Україні в сфері управління відходами є неефективність систем збирання та транспортування побутових відходів від місць утворення до об'єктів перероблення, відновлення або видалення відходів. Техніко-економічні показники системи збирання та транспортування побутових відходів залежать від обсягів утворення побутових відходів. Відомо, що основними джерелами утворення побутових відходів в населених пунктах є житлові будинки домогосподарств та підприємства, організації, установи.

Проектування схеми системи збирання та транспортування побутових відходів та визначення її потужності залежать від обсягів утворення відходів, обраної технології відновлення та видалення відходів, природно-кліматичних умов в регіоні, особливостей рельєфу місцевості, перспективи забудови території, прогнозованої зміни чисельності населення, морфологічного складу та фізико-хімічних властивостей побутових відходів.

Прогнозування обсягів утворення побутових відходів з урахуванням соціально-демографічних, містобудівних, економічних чинників стає можливим при визначенні норми надання послуг з вивезення побутових відходів.

Норми надання послуг з вивезення побутових відходів – це кількісний показник споживання послуг з вивезення побутових відходів, які утворюються на одну розрахункову одиницю за певний час (наприклад, добу, місяць або рік) [1].

Визначення норм дозволяє використовувати отримані значення при розрахунках техніко-економічних параметрів систем збирання та перевезення побутових відходів при розробці Схем санітарного очищення та прибирання населених пунктів, плануванні господарської діяльності, розробці регіональних та місцевих планів управління відходами або при проектуванні нових ділянок забудови населених пунктів.

Робота виконується в рамках реалізації Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України № 820-р від 8 листопада 2017 року та з урахуванням вимог постанови Кабінету Міністрів України № 1070 від 10.12.2008 «Про затвердження Правил надання послуг з вивезення побутових відходів».

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Науковий та практичний досвід авторів робіт [2-5] засвідчує суттєвий вплив різних факторів на обсяги утворення побутових відходів. Так, в роботі [2] показано, що найбільший вплив на утворення побутових відходів в м. Житомир мають доходи населення. В статті зазначається, що розвиток промислових виробництв та зростання рівня благополуччя громадян напряму впливають на обсяги утворення ТПВ. В той же час, автори при прогнозуванні обсягів утворення використовують прогнозні показники чисельності населення [2].

Вплив на збільшення норми утворення побутових відходів під дією змін у споживанні та соціально-економічному розвитку відображено в роботі [4]. Автори роботи використовують норму надання послуг з вивезення побутових відходів як вихідну інформацію для дослідження регіональних особливостей захоронення побутових відходів.

Також визначення норм утворення та використання при подальших прогнозах розрахунках обсягів утворення побутових відходів зазначено в роботах [4-14].

Таким чином, визначення норм надання послуг з вивезення побутових відходів дозволить забезпечити ефективне прогнозування обсягів утворення побутових відходів в населеному пункті та розрахувати техніко-економічні показники системи збирання та транспортування побутових відходів.

**3. Матеріали та методи.** Визначення кількісних показників утворення побутових відходів від житлових будинків багатоквартирних та одноквартирних (з наявністю усіх видів благоустрою), житлових будинків індивідуальної забудови (будинків приватного сектору), підприємств, установ та організацій на прикладі населених пунктів Вараської міської територіальної громади

**4. Результати дослідження.** Визначення норм надання послуг з вивезення побутових відходів розроблялись згідно з вимогами Правил визначення норм надання послуг з вивезення побутових відходів, затверджених наказом Мінжитлокомунгоспу України № 259 від 30.07.2010 р. [1].

Для розрахунку норм визначають фактичну кількість побутових відходів за джерелами їх утворення на основі натурних замірів протягом 7 днів. Середньорічні розрахунки включають використання коефіцієнтів сезонної нерівномірності утворення твердих побутових відходів (за об'ємом).

Тверді побутові відходи у Вараській міській територіальній громаді збираються, переважно, в контейнери місткістю 0,75 м<sup>3</sup>, 1,1 м<sup>3</sup> які розміщені в місті на контейнерних майданчиках або безпосередньо в сміттєвоз, коли він рухається за маршрутом.

Для населених пунктів Вараської міської територіальної громади відповідно до вимог [1] прийнято, що вимірювання кількості ТПВ для житлових будинків проводять на частині території житлової забудови населеного пункту, де проживають 2% від загальної чисельності мешканців.

Для проведення досліджень були обрані три контейнерні майданчики багатоквартирних будинків з населенням 589 чол., сім вулиць з населенням 530 чол. В одноквартирних будинках та будинках індивідуальної забудови, з присадибною ділянкою.

Під час вимірювання кількості твердих побутових відходів, що утворюються на підприємствах, установах, організаціях, обирають найбільш характерні для даного населеного пункту джерела у кількості не менше двох.

Для проведення замірів і досліджень були прийняті наступні види джерел утворення ТПВ:

- Житлові будинки багатоквартирні та одноквартирні упорядковані (з наявністю усіх видів благоустрою);
- Житлові будинки індивідуальної забудови (будинки приватного сектору), з присадибною ділянкою;
- Готелі;
- Гуртожитки;
- Загальноосвітні школи;
- Дошкільні дитячі заклади;
- Склади;
- Адміністративні та громадські установи і організації;
- Заклади культури і мистецтва;
- Промтоварні магазини, ларьки, кіоски;
- Продовольчі магазини, ларьки, кіоски;
- Аптеки;
- Ринки;
- Заклади громадського харчування (ресторани, кафе, їдальні та ін.);
- Підприємства побутового обслуговування;
- Поліклініки;

- Кладовища, колумбарії.

В період з 04.10 по 10.10.2022 р. проведені натурні дослідження на території Вараської міської територіальної громади.

На обраних джерелах утворення побутових відходів у визначені терміни в місцях розміщення сміттєзбірних контейнерів здійснювались щоденні (впродовж не менш семи днів поспіль) спостереження та заміри кількості відходів за об'ємом та масою.

Для вимірювання кількості твердих побутових відходів використовували наступне обладнання:

- а) рулетка;
- б) динамометр ДПУ-5-2 5 на 500 кг, похибка зважування  $\pm 2\%$ ;

Вимірювання кількості твердих побутових відходів розпочинали з вибору маршрутів спеціального автотранспорту, що здійснює збирання та перевезення твердих побутових відходів (сміттєвоз), для кожного з обраних джерел, а також кількості розрахункових одиниць для кожного маршруту.

Під час проведення вимірювання кількості твердих побутових відходів фіксували:

- кількість контейнерів, од.;
- об'єм кожного контейнера, куб. м;
- ступінь заповнення контейнерів твердими побутовими відходами;
- масу контейнера порожнього та заповненого твердими побутовими відходами або масу порожнього та заповненого твердими побутовими відходами сміттєвоза, т.

Перед початком вимірювання усі контейнери були очищені від твердих побутових відходів.

Під час вимірювання була виключена можливість ущільнення обслуговуючим персоналом твердих побутових відходів у контейнері.

Під час проведення вимірювання кількості твердих побутових відходів поверхня твердих побутових відходів, що знаходилися в контейнері, розрівнювалась та визначалась ступінь його заповнення. Об'єм твердих побутових відходів дорівнював об'єму наповненої відходами частини контейнера.

Якщо контейнер був наповнений з верхом, надлишок ТПВ знімали, перевантажували у незаповнений контейнер, або, у разі його відсутності, завантажували у той самий контейнер після його спорожнення, після чого проводили вимірювання.

Після відповідної систематизації, дані заносились у спеціальні табличні форми первинних даних. Після чого ці первинні дані опрацьовувалися за стандартними методиками статистичного опрацювання та аналізу експериментальних даних наукових досліджень із визначенням середньостатистичних величин, середніх значень досліджуваних величин, їх вірогідних інтервалів тощо.

Для джерел утворення побутових відходів, на яких відходи утворюються щоденно, середньорічна норма ( $m^3$ ) за рік розраховується множенням середньодобової норми на 365 (кількість днів року), для підприємств, установ та організацій – 251.

Результати натурних замірів ТПВ за об'єктами їх утворення наведені в табл. 1.

Середня щільність твердих побутових відходів, які утворюються у житлових будинках, а також на підприємствах, установах і організаціях, розраховується за формулою:

$$\rho_{\text{ср.}} = \left( \left[ \frac{(\rho_{\text{б.б.}} * K_{\text{б.б.}} + \rho_{\text{п.с.}} * K_{\text{п.с.}})}{K_{\text{б.б.}} + K_{\text{п.с.}}} \right] + \rho_{\text{с.п}} \right) \times 0,5, \quad (1)$$

де  $\rho_{\text{б.б.}}$  - середня арифметична щільність твердих побутових відходів, які утворюються у багатоквартирних житлових будинках,  $kg/m^3$ ;  $K_{\text{б.б.}}$  - кількість населення у багатоквартирних житлових будинках в межах дослідження, чол.;  $\rho_{\text{п.с.}}$  - середня арифметична щільність твердих побутових відходів, які утворюються у житлових будинках приватного сектору,  $kg/m^3$ ;  $K_{\text{п.с.}}$  - кількість населення у житлових будинках приватного сектору в межах дослідження,



чол.;  $\rho_{c.n}$  - середня арифметична щільність твердих побутових відходів, які утворюються на підприємствах, установах і організаціях,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{сep.}$  - середня щільність твердих побутових відходів, які утворюються у житлових будинках, а також на підприємствах, установах і організаціях,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Таблиця 1 – Норми надання послуг з вивезення побутових відходів у Вараській міській територіальній громаді

Table 2 - Standards for the provision of services from the export of household goods from the Varaska territorial community

№ з/п	Об'єкт утворення ТПВ	Розрахункова одиниця	Норма на одну розрахункову одиницю		Середня щільність
			середня на рік		
			$\text{м}^3$	кг	$\text{кг}/\text{м}^3$
1.	Житлові будинки багатоквартирні та одноквартирні упорядковані (з наявністю усіх видів благоустрою)	1 мешканець	1,28	210,6	165
2.	Житлові будинки індивідуальної забудови (будинки приватного сектору), з присадибною ділянкою	1 мешканець	3,09	471,2	152
3.	Гуртожитки	1 місце	0,70	121,6	173
4.	-заклади загальної середньої, професійної (професійно-технічної), позашкільної освіти	1 учень, 1 вихованець	0,10	16,3	171
	-ліцеї, профтехучилища	1 учень	0,10	15,9	167
	-заклади дошкільної освіти	1 місце	0,24	34,2	144
5.	Адміністративні та громадські установи та організації	1 роб. місце	0,39	67,0	172
6.	Заклади культури і мистецтва	1 місце	0,55	99,6	183
7.	Промтоварні магазини, ларьки, кіоски	1 $\text{м}^2$ торг. площі	0,49	83,6	171
8.	Продуктові магазини, ларьки, кіоски	1 $\text{м}^2$ торг. площі	0,64	125,4	195
9.	Аптеки	1 $\text{м}^2$ торг. площі	0,17	25,4	147
10.	Ринки	1 $\text{м}^2$ торг. площі	0,77	144,6	189
11.	Заклади громадського харчування (ресторани, кафе, їдальні та ін.)	1 місце	1,36	287,4	211
12.	Підприємства побутового обслуговування	1 роб. Місце	0,33	64,0	196
13.	Лікарні	1 ліжко	2,01	386,3	192
14.	Поліклініки	1 відвідування	0,005	0,84	160
15.	Вокзали, автовокзали	1 $\text{м}^2$ пас. площі	1,00	212,1	212
16.	Автокооперативи	1 місце	0,66	120,7	183

Провівши вищезгадані розрахунки ми отримали, що середня щільність ТПВ на території Вараської міської територіальної громади складає  $170,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

На рис. 1 показано обсяги замірів утворення побутових відходів на досліджуваних об'єктах, а саме житлових будинків багатоквартирних та житлових будинків індивідуальної забудови.

На рисунку 1, а ми бачимо, що тенденція обсягів утворення побутових відходів з понеділка по п'ятницю є середньо-стабільною з максимальним значенням до  $13 \text{ м}^3$  із падінням у 2 день (вівторок) до 6.

На рис. 1, б ми бачимо, що тенденція обсягів утворення побутових відходів з понеділка по п'ятницю є варіативною, з піковими значеннями у понеділок та четвер до  $17 \text{ м}^3$ , та середнім обсягом утворення від 9 до  $15 \text{ м}^3$  у інші дні. Отримані результати дозволяють спрогнозувати обсяги утворення відходів, що забезпечить краще оптимізування графіків та маршрутів для збирання побутових відходів спеціально обладнаними транспортними засобами.

Залежність обсягів утворення побутових відходів до дня тижня наведені на рис. 1.

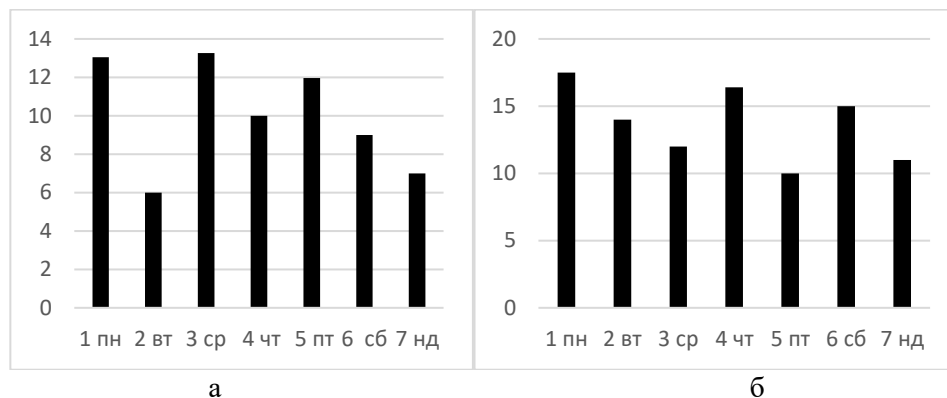


Рис. 1. Залежність обсягів утворення побутових відходів від населення на території Вараської міської територіальної громади (куб.м):

а - багатоквартирного сектору; б - індивідуальної забудови

Fig. 1 - The extent of obligations for the establishment of daily income from the population in the territory of the Varaska Municipality Territorial Community (cubic meters):

a - the rich housing sector; b - individual forgetting

**5. Висновки і перспективи подальших досліджень.** Проведені натурні заміри та розрахунки норм надання послуг з вивезення твердих побутових відходів для житлових будинків багатоквартирних та одноквартирних (з наявністю усіх видів благоустрою), житлових будинків індивідуальної забудови (будинків приватного сектору), з присадибною ділянкою, готелів, гуртожитків, учбових закладів: закладів фахової передвищої, вищої, післядипломної освіти, закладів загальної середньої, професійної (професійно-технічної), позашкільної освіти, заклади дошкільної освіти, складів, адміністративних та громадських установ та організацій, закладів культури і мистецтв, промтоварних магазинів, ларьків, кіосків, продовольчих магазинів, ларьків, кіосків, аптек, ринків, закладів громадського харчування (ресторанів, кафе, їдальнь та ін.), підприємств побутового обслуговування, лікарень, поліклінік, вокзалів, автовокзалів, санаторіїв, пансіонатів, автокооперативів серед яких було обрано не менше двох найбільш характерних для Вараської міської територіальної громади.

Отримані результати досліджень дозволять забезпечити прогнозування обсягів утворення побутових відходів з урахуванням соціально-демографічних, містобудівних, економічних чинників. Норми надання послуг з вивезення побутових відходів будуть закладені в прогнозні розрахунки обсягів робіт з управління відходами території населених пунктів Вараської міської територіальної громади та розрахунку тарифів на надання послуг з поводження з побутовими відходами.

#### Список використаних джерел:

1. Про затвердження Правил визначення норм надання послуг з вивезення побутових відходів, Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства України № 259 (2021) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0871-10#Text>
2. Коцюба, І. Г., Щербатюк, А. Ф., & Годовська, Т. Б. (2016). Прогнозування обсягів утворення твердих побутових відходів в місті Житомирі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Механіко-технологічні системи та комплекси*, (7), 95–100. <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/93183>

3. Буряк, Н. Б., & Лукаш, С. В. (2012). Проблеми збирання, транспортування та утилізації твердих побутових відходів в Україні. *Науковий вісник НЛТУ України*, (5), 82–90.
4. Приходько, В. Ю. (2019). Дослідження регіональних особливостей захоронення твердих побутових відходів в Україні. *Вісник Харківського національного університету імені ВН Каразіна Серія "Екологія"*, (21), 51–62.
5. Масловський, М. А., & Шаніна, Т. П. (б. д.). Неоднорідність умов утворення твердих побутових відходів у Київському районі міста Одеси. У *Галузеві проблеми екологічної безпеки* (с. 112–114).
6. Рябічев, В. Д., & Кіященко, В. В. (2011). Тверді побутові відходи - екологічна загроза міста. У *ІV Міжнародна науково-практична конференція "Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД"* (с. 171–174). Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля.
7. Храпцова, А. М., & Коцюба, І. Г. (2017). Прогнозування обсягів утворення твердих побутових відходів в місті Житомирі. У *Тези Всеукраїнської науково-практичної он-лайн конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки* (с. 241–241). ЖДТУ.
8. Huang, L., Cai, T., Zhu, Y., Zhu, Y., Wang, W., & Sun, K. (2020). LSTM-Based forecasting for urban construction waste generation. *Sustainability*, 12(20), 8555. <https://doi.org/10.3390/su12208555>
9. Soni, U., Roy, A., Verma, A., & Jain, V. (2019). Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence models—a case study in India. *SN Applied Sciences*, 1(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0157-x>
10. Al-Khatib, I. A., Eleyan, D., & Garfield, J. (2015). A system dynamics model to predict municipal waste generation and management costs in developing areas. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 41(2), 109–120. <https://doi.org/10.5276/jswtm.2015.109>
11. Chhay, L., Reyad, M. A. H., Suy, R., Islam, M. R., & Mian, M. M. (2018). Municipal solid waste generation in China: Influencing factor analysis and multi-model forecasting. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(3), 1761–1770. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0743-4>
12. Minousepahr, M., Alizadeh, M. R., & Talebbeydokhti, N. (2017). Performance assessment of computational intelligence techniques in solid waste generation forecasting: (A case study). *Civil and Environmental Engineering*, 67–75.
13. Hoang, Minh & Pham Phu, Song Toan & K.T., Nguyen & Fujiwara, Takeshi. (2017). Predicting waste generation using Bayesian model averaging. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3, 385–402. 10.22034/GJESM.2017.03.04.005
14. Klavenieks, K., & Blumberga, D. (2016). Forecast of waste generation dynamics in Latvia. *Energy Procedia*, 95, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.049>
15. Moruf, A. A., Oluwasinaayomi, F. K., & Mubarak, O. L. (2020). Public-Private Partnership (PPP) in residential solid waste management in Ibadan: *Challenges and opportunities*. *Journal of Geography and Regional Planning*, 13(1), 30–40. <https://doi.org/10.5897/jgrp2019.0721>
16. Aparcana, S. (2017). Approaches to formalization of the informal waste sector into municipal solid waste management systems in low- and middle-income countries: Review of barriers and success factors. *Waste Management*, 61, 593–607. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.028>
17. Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
18. Sinha, R., Michelsen, J. D., Akcura, E., & Njie, L. (б. д.). *COVID-19's impact on the waste sector*. <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/dfbceda0-847d-4c16-9772-15c6afdc8d85/202006-COVID-19-impact-on-waste-sector.pdf?MOD=AJPERES&CVID=na-eKpI>.
19. Kulkarni, B. N., & Anantharama, V. (2020). Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 743, 140693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693>
20. Mol, M. P. G., & Caldas, S. (2020). Can the human coronavirus epidemic also spread through solid waste? *Waste Management & Research*, 38(5), 485–486. <https://doi.org/10.1177/0734242x20918312>
21. Rajmohan, K. V. S., Ramya, C., Raja Viswanathan, M., & Varjani, S. (2019). Plastic pollutants: Effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>

**References:**

1. Pro zatverdzhennja Pravyl vyznachennja norm nadannja poslug z vyvezennja pobutovyh vidhodiv, Nakaz Ministerstva z pytan' zhytlovo-komunal'nogo gospodarstva Ukrai'ny № 259 (2021) (Ukrai'na). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0871-10#Text> (in Ukrainian).
2. Kocjuba, I. G., Shherbatjuk, A. F., & Godovs'ka, T. B. (2016). Prognozuvannja obsjagiv utvorennja tverdyh pobutovyh vidhodiv v misti Zhytomyri. *Visnyk Nacional'nogo tehnicznego universytetu «HPI». Serija: Mehaniko-tehnologichni systemy ta komplekсы*, (7), 95–100. <http://mtsc.khpi.edu.ua/article/view/93183> (in Ukrainian).
3. Burjak, N. B., & Lukash, S. V. (2012). Problemy zbyrannja, transportuvannja ta utylizacii' tverdyh pobutovyh vidhodiv v Ukrai'ni. *Naukovyj visnyk NLTU Ukrai'ny*, (5), 82–90 (in Ukrainian).
4. Pryhod'ko, V. Ju. (2019). Doslidzhennja regional'nyh osoblyvostej zahoronennja tverdyh pobutovyh vidhodiv v Ukrai'ni. *Visnyk Harkivs'kogo nacional'nogo universytetu imeni VN Karazina Serija "Ekologija"*, (21), 51–62 (in Ukrainian).
5. Maslovs'kyj, M. A., & Shanina, T. P. (b. d.). Neodnoridnist' umov utvorennja tverdyh pobutovyh vidhodiv u Kyi'vs'komu rajoni mista Odesy. *U Galuzevi problemy ekologichnoi' bezpeky* (s. 112–114) (in Ukrainian).
6. Rjabichev, V. D., & Kijashhenko, V. V. (2011). Tverdi pobutovi vidhody - ekologichna zagroza mista. *U IV Mizhnarodna naukovo-praktychna konferencija "Ekonomichni, ekologichni ta social'ni problemy vugil'nyh regioniv SND"* (s. 171–174). Shidnoukrai'ns'kyj nacional'nyj universytet imeni Volodymyra Dalja (in Ukrainian).
7. Hramcova, A. M., & Kocjuba, I. G. (2017). Prognozuvannja obsjagiv utvorennja tverdyh pobutovyh vidhodiv v misti Zhytomyri. *U Tezy Vseukrai'ns'koi' naukovo-praktychnoi' on-line konferencii' aspirantiv, molodyh uchenyh ta studentiv, prysvjachenoj' Dnju nauky* (s. 241–241). ZhDTU. Huang, L., Cai, T., Zhu, Y., Zhu, Y., Wang, W., & Sun, K. (2020). LSTM-Based forecasting for urban construction waste generation. *Sustainability*, 12(20), 8555. <https://doi.org/10.3390/su12208555> (in Ukrainian).
8. Huang, L., Cai, T., Zhu, Y., Zhu, Y., Wang, W., & Sun, K. (2020). LSTM-Based forecasting for urban construction waste generation. *Sustainability*, 12(20), 8555. <https://doi.org/10.3390/su12208555>
9. Soni, U., Roy, A., Verma, A., & Jain, V. (2019). Forecasting municipal solid waste generation using artificial intelligence models—a case study in India. *SN Applied Sciences*, 1(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-018-0157-x>
10. Al-Khatib, I. A., Eleyan, D., & Garfield, J. (2015). A system dynamics model to predict municipal waste generation and management costs in developing areas. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 41(2), 109–120. <https://doi.org/10.5276/jswtm.2015.109>
11. Chhay, L., Reyad, M. A. H., Suy, R., Islam, M. R., & Mian, M. M. (2018). Municipal solid waste generation in China: Influencing factor analysis and multi-model forecasting. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(3), 1761–1770. <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0743-4>
12. Minousepehr, M., Alizadeh, M. R., & Talebbeydokhti, N. (2017). Performance assessment of computational intelligence techniques in solid waste generation forecasting: (A case study). *Civil and Environmental Engineering*, 67–75.
13. Hoang, Minh & Pham Phu, Song Toan & K.T., Nguyen & Fujiwara, Takeshi. (2017). Predicting waste generation using Bayesian model averaging. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3, 385-402. 10.22034/GJESM.2017.03.04.005
14. Klavenieks, K., & Blumberga, D. (2016). Forecast of waste generation dynamics in latvia. *Energy Procedia*, 95, 200–207. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.049>
15. Moruf, A. A., Oluwasinaayomi, F. K., & Mubarak, O. L. (2020). Public-Private Partnership (PPP) in residential solid waste management in Ibadan: *Challenges and opportunities*. *Journal of Geography and Regional Planning*, 13(1), 30–40. <https://doi.org/10.5897/jgrp2019.0721>
16. Aparcana, S. (2017). Approaches to formalization of the informal waste sector into municipal solid waste management systems in low- and middle-income countries: Review of barriers and success factors. *Waste Management*, 61, 593–607. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.028>
17. Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060. <https://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
18. Sinha, R., Michelsen, J. D., Akcura, E., & Njie, L. (б. д.). *COVID-19's impact on the waste sector*. <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/dfbcda0-847d-4c16-9772-15c6afdc8d85/202006-COVID-19->

impact-on-waste-sector.pdf?MOD=AJPERES&CVID=na-eKpI. <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/dfbceda0-847d-4c16-9772-15c6afdc8d85/202006-COVID-19-impact-on-waste-sector.pdf?MOD=AJPERES&CVID=na-eKpI>

19. Kulkarni, B. N., & Anantharama, V. (2020). Repercussions of COVID-19 pandemic on municipal solid waste management: Challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 743, 140693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140693>
20. Mol, M. P. G., & Caldas, S. (2020). Can the human coronavirus epidemic also spread through solid waste? *Waste Management & Research*, 38(5), 485–486. <https://doi.org/10.1177/0734242x20918312>
21. Rajmohan, K. V. S., Ramya, C., Raja Viswanathan, M., & Varjani, S. (2019). Plastic pollutants: Effective waste management for pollution control and abatement. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>

УДК 502/504:556

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0413>**Валерій Фролов**

доктор технічних наук, професор кафедри Фізики  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1675-8476>  
E-mail: [frolov.vf@knuba.edu.ua](mailto:frolov.vf@knuba.edu.ua)

**Світлана Маджд**

докторка технічних наук, професорка кафедри Екології,  
Національний авіаційний університет  
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2857-894X>  
E-mail: [madzhd@i.ua](mailto:madzhd@i.ua)

**Анастасія Ковальова**

докторка філософії,  
асистент кафедри Технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
просп. Повітряних сил, 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1060-3425>  
E-mail: [kovalova.av@knuba.edu.ua](mailto:kovalova.av@knuba.edu.ua)

**НАУКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТРОЛЮ СТАНУ ДОННИХ ВІДКЛАДЕНЬ, ЯК ІНДИКАТОРА РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ГІДРОЕКОСИСТЕМ**

**АНОТАЦІЯ.** В роботі запропонована методика проведення контролю стану поверхневих водних об'єктів на території, яка підлягала впливу підприємств авіаційної галузі, шляхом дослідження забрудненості донних відкладів. На прикладі нафтових вуглеводнів - специфічних забруднювачів авіаційних підприємств доведено, що донні відклади є інтегральним показником рівня техногенного забруднення, індикатором рівня екологічної безпеки гідроекосистем. Розраховані коефіцієнти донної акумуляції вказують на прогресуюче забруднення водойми та накопичення основної маси забруднюючих речовин в донних відкладах. Результати досліджень малої річки, що протікає вздовж авіапідприємств свідчать, що донні відклади відносяться до категорії "надзвичайно забруднених" і з одного боку сприяють процесу самоочищення водного середовища, акумулюючи в собі нафтопродукти, проте з іншого боку вони являють собою небезпеку вторинного забруднення водної товщі, оскільки при зміні фізико-хімічних умов забруднювачі з донних відкладів здатні переходити у водну фазу.

**Ключові слова:** донні відкладення, гідроекосистеми, індикатор екологічної небезпек, токсифікація екосистем, суцесійні зміни, внутрішньоводоймна перебудова.

**SCIENTIFIC TECHNOLOGIES OF MONITORING THE STATE OF BOTTOM SEDIMENTS, AS AN INDICATOR OF THE LEVEL OF ENVIRONMENTAL DANGER TO HYDROECOSYSTEMS**

**ABSTRACT.** The work proposes a method of monitoring the condition of surface water bodies on the territory, which was subject to the influence of enterprises of the aviation industry, by studying the contamination of bottom deposits. Using the example of petroleum hydrocarbons - specific pollutants of aviation enterprises, it is proved that bottom sediments are an integral indicator of the level of man-made pollution, an indicator of the level of ecological safety of hydroecosystems. The calculated coefficients of bottom accumulation indicate progressive water pollution and accumulation of the main mass of pollutants in bottom sediments. The results of the research of the small river flowing along the airline show that the bottom sediments belong to the category of "extremely polluted" and on the one hand, they contribute to the process of self-purification of the water environment by accumulating oil products, but on the other hand, they represent

*a danger of secondary pollution of the water column, after which, when physical and chemical conditions change, pollutants from bottom sediments are able to move into the water phase.*

**Keywords:** *bottom sediments, hydroecosystems, indicator of ecological danger, toxification of ecosystems, successional changes, in-reservoir reconstruction.*

**1. Постановка проблеми.** Для визначення рівня екологічної небезпеки антропогенно навантажених поверхневих водних екосистем необхідно знати динаміку перерозподілу забруднювачів в її основних складових (у водних масах, біоті, донних відкладах). В роботі зосереджено увагу на основному індикаторі екологічного стану гідроекосистеми – донних відкладах.

Реалізація запропонованої методики можлива через дослідження стану донних відкладів, як індикатора рівня екологічної небезпеки гідроекосистем. Для пояснення стану процесів використані загальнотеоретичні основи організації гідроекосистеми як цілісної структури, що описується з точки зору теорії систем. Згідно з цією теорією водні екосистеми розглядаються як відкриті термодинамічні системи, що мають структурну цілісність та характеризуються функціональною єдністю структурних компонентів, яка забезпечується в результаті процесів саморегуляції та адаптації [1-3].

Водні екосистеми здатні самоочищуватись від забруднювачів у ході протікання таких фізико-хімічних і біологічних внутрішньоводоймних процесів [1]:

- розведення;
- перенесення течією;
- механічне руйнування (перетирання) мінеральними частинками;
- сорбція зваженими часинками;
- зв'язування в неактивні комплексні сполуки (важкі метали);
- трансформація в інші нетоксичні сполуки;
- накопичення в ланках трофічного ланцюгів;
- седиментація в донних відкладах з наступним їхнім замуленням.

В результаті проходження зазначених внутрішньоводоймних процесів концентрація токсикантів у водних масах істотно зменшується, але зростає в донних відкладах і в тканинах гідробіонтів. Результатом такого перерозподілу токсичних речовин може бути хронічна токсифікація екосистеми, що супроводжується різким зменшенням продуктивності популяцій або масовою загибеллю живих організмів. Такий перерозподіл токсикантів є не справжньою детоксикацією, а умовною, оскільки наслідки накопичення токсикантів в донних відкладах проявляються в екстремальних ситуаціях – змуленні донних відкладів під час штормів та внаслідок скидання значних обсягів водних мас. За таких екстремальних умов відбувається зворотній перехід токсикантів з донних відкладів у товщу водних мас при одночасному підвищенні її каламутності. Одночасно із вторинним забрудненням водного середовища фіксується гостра нестача кисню, що призводить до замору риб і безхребетних.

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фізичною і фізико-хімічною основою реагування поверхневих водних екосистем на пошкодуючі впливи забруднювачів є закони термодинаміки і принцип Ле Шательє-Брауна [4]. Розвиток водних екосистем має певний незворотній напрям, який проявляється у сукцесійних змінах, наприклад, трофності водойм, що відповідає другому закону термодинаміки. При збільшенні обсягів надходження до водойм забруднюючих речовин, у системі збільшується протидія, відбувається внутрішньоводоймна перебудова, спрямована на нейтралізацію даного забруднювача. Ця протидія спрямована на зниження рівня дисбалансу в гідроекосистемі. Чим інтенсивніший вплив забруднювачів – тим інтенсивніша внутрішньоводоймна перебудова (принцип Ле Шательє-Брауна). При критичних концентраціях забруднювачів водних система втрачає здатність до внутрішньоводоймною перебудови. При надходженні низьких концентрацій забруднювачів до приоро-

дних водойм відбуваються лише обмежені коливання параметрів системи, які можуть накопичуватися, що у кінцевому результаті, з часом, також призведе до руйнування водної екосистеми але у більш віддалений час [1,4].

Донні відклади мають здатність інтенсивно абсорбувати токсичні речовини, які взаємодіючи з органічними компонентами та можуть утворювати комплексні сполуки, які втрачають токсичні властивості. У зв'язку з цим прямий токсичний вплив на водні маси та біоту значно послаблюється. Нестійкі органічні токсиканти руйнуються мікроорганізмами донних відкладів або частково трансформуються мікро- чи мезобентосними організмами, які живляться мулом (нематоди, олігохети, личинки хірономід).

**3. Мета роботи.** Створити наукові основи контролю хімічного стану поверхневих водойм через оцінювання стану донних відкладів, як індикатора рівня їх екологічної небезпеки.

**4. Матеріали та методи.** Проведення хімічних досліджень стану донних відкладів, як індикатора екологічного стану поверхневих водних об'єктів, більш результативним буде на прикладі малої річки. Навесні, влітку і восени здійснювались дослідження стану малої р. Нивка, що є об'єктом з високим антропогенним навантаженням і протікає в районі впливу авіатransпортних процесів. В даній водній екосистемі була здійснена оцінка поверхневого, придонного шару води та донних відкладів.

Перша проба була відібрана в місці, що знаходиться у житловому масиві Жуляни – за 100 м вище скиду стічних вод авіапідприємств. Відібрана вода була прозорою, донні відклади мали світло-коричневий колір і не мали запаху. Оскільки дана точка відбору розташована вище міста скидання стічних вод авіапідприємств, тому її було прийнято за «умовний контроль».

Другу пробу води відбирали в місці скиду стічних вод авіаційних підприємств. Вода мала неприємний запах, місцями на поверхні водойми плавала плівка. Відібрана вода була непрозора, з плаваючими домішками. Донні відклади були чорного кольору, мали запах нафтопродуктів на сірководню.

Третю пробу води та донних відкладів відбирали за 100 м після скиду стічних вод, в місці розсіювання забруднювачів. Донні відклади мали неприємний запах нафтопродуктів і були чорного кольору.

Проби води та донних відкладів відбирались і досліджувались за допомогою стандартних методик [5]. Проби води аналізували за допомогою органолептичних, гідрохімічних методів [6-8] та за вмістом нафтопродуктів [9].

Суть методу на визначення нафтових вуглеводнів полягає в тому, що проби води (1 л) підкиснювались до  $\text{pH} = 2$  і до них додавалось 2 г  $\text{NaCl}$  на кожний літр води. Далі проводилась екстракція тетрахлоридом вуглецю в ділільній лійці. Розчинник додавався окремими порціями. Процес очікування розшарування складав 10 хвилин, після чого екстракт збирався у колбу з скляною пробкою. Екстракт висушувався прожареним сульфатом натрію, відбиралась порцію 50 мл та пропускався через колонку з оксидом алюмінію. Зібраний елюат в мірній колбі ємністю 100 мл пропускався через колонку ще 45 мл чистого тетрахлоретану та доводився цим же розчинником об'єм розчину в колбі до мітки. На екстрагування витрачалось 60 мл екстрагенту. Інфрачервоний спектр отриманого розчину знімали, користуючись кюветою з товщиною шару 50 мм. Оптичну густину вимірювали при довжині хвилі  $2926 \text{ cm}^{-1}$ .

### 5. Результати.

Для проведення досліджень, щодо акумуляції забруднювачів донними відкладами, зокрема, специфічного забруднювача авіаційних підприємств – нафтопродуктів, слід відзначити, що в присутності нафтових вуглеводнів донні відклади та вода набуває специфічного смаку і запаху, змінюється її колір,  $\text{pH}$ , погіршується газообмін з атмосферою.

Результати власних попередніх досліджень [10-20] свідчать, що гідроекосистема, яка знаходиться під інтенсивним впливом підприємств авіаційної галузі, за показником  $\text{pH}$  поверхневого і придонного шару води в усіх досліджуваних точках не виходить за межі допустимих значень (6,–8,5). За ступенем загальної мінералізації усі досліджені проби не перевищують нормативів і характеризуються як прісні води I класу якості, 2 категорії. За існуючими



класифікаціями досліджену воду поверхневого і придонного шару води можна віднести до води середньої твердості. У місці скиду стічних вод величина показника ХСК для вод поверхні в 1,5 рази перевищує ГДК<sub>госп./поб</sub> і в 2,2 рази ГДК<sub>р/госп.</sub> У пробі придонного шару води після скиду стоку встановлено перевищення ГДК<sub>госп./поб</sub> призначення у 1,6 рази. Перевищення ГДК<sub>р/госп.</sub> категорії для придонних вод становить 2,5 разів. Поверхневу воду річки до стоку і після стоку можна віднести до II класу 3 категорії якості води, а в місці стоку – до IV класу і 6 категорії; придонні води до стоку і в місці стоку – до II класу 3 категорії, після стоку – до IV класу 6 категорії якості води. Майже у всіх проаналізованих пробах виявлено перевищення нормативів за БСК<sub>5</sub>: у воді поверхні від 1,5 до 7,5 ГДК<sub>госп./поб</sub> призначення та 1,9–15,0 ГДК<sub>р/госп.</sub> категорії. У придонному шарі води спостерігається тенденція до зростання БСК<sub>5</sub> в районі скиду стічних вод і нижче за течією (від 1,1 до 3,6 ГДК<sub>госп./поб</sub> і 2,3–7,3 ГДК<sub>р/госп.</sub>). За значенням БСК<sub>5</sub> воду поверхні річки до стоку можна віднести до III класу 4 категорії якості води, в місці стоку – до V класу 7 категорії, після стоку – до III класу 5 категорії; придонний шар води до стоку відноситься до III класу 4 категорії, а в місці скиду і після скиду – до V класу 7 категорії якості води.

У всіх досліджуваних пробах води річок, що протікають вздовж авіапідприємств виявлено значне перевищення вмісту азоту амонійного. Високий рівень забруднення N/NH<sub>4</sub> спостерігався в місці скиду стічних вод – 38 мг/дм<sup>3</sup>. В інших пробах вод поверхні перевищення становить від 1,2 до 19 разів відносно до ГДК<sub>госп./поб.</sub> та 6,4–97 разів ГДК<sub>р/госп.</sub> У придонному шарі води вміст азоту амонійного перевищує ГДК<sub>госп./поб.</sub> в 1,6–6,6 рази та в 8,2–34 рази ГДК<sub>р/госп.</sub>

Концентрація нітритів у всіх пробах поверхневого і придонного шару води не перевищує ГДК, що встановлена для водойм господарсько-побутового призначення. Щодо нормативу, який встановлено для водойм рибогосподарського призначення, то перевищення за азотом нітритів спостерігалось в пробах води поверхневого шару в 15–45 разів, в пробах придонного шару – в 25–45 разів.

Донні відклади в гідроекосистемі протягом тривалого періоду акумулюють нафтопродукти – специфічні забруднювачі авіапідприємств, що надходять до водойми і за рахунок цього є своєрідним „депо”, їх накопичувачем, інтегральним показником рівня техногенного забруднення.

При постійному надходженні нафтових вуглеводнів до водної екосистеми донні відклади з одного боку сприяють процесу самоочищення водного середовища, акумулюючи в собі нафтопродукти, а з іншого боку являють собою небезпеку вторинного забруднення гідроекосистеми, оскільки при зміні фізико-хімічних умов придонних вод забруднювачі з донних відкладень здатні переходити у водну фазу. Результати здійснених експериментальних досліджень вказують на надзвичайно високе забруднення нафтовими вуглеводнями донних відкладів малої річки, що досліджувалась. Концентрація нафтопродуктів в донних відкладах більше ніж у 2000 разів перевищує їх вміст у поверхневих шарах води. В ході досліджень встановлений високий ступінь забруднення нафтопродуктами поверхневого (в 12–198 разів вище, ніж ГДК<sub>р/госп.</sub>) та придонного шару води (від 16 до 39 разів, ніж ГДК<sub>госп./поб.</sub>).

Високий вміст нафтопродуктів свідчить про вплив діяльності авіапідприємств на дослідну малу річку. Утворюючи тонку плівку на поверхні води, нафтопродукти змінюють газовий та температурний режим води швидкість руйнування, випаровування чи осадження їх компонентів. Негативний вплив нафтопродуктів проявляється в порушенні функціонування водної екосистеми загалом та в порушенні розвитку вищих водяних рослин. Вуглеводні, які входять до складу нафтопродуктів, здійснюють токсичну, а в деяких випадках, наркотичну дію на живі організми річкової екосистеми.

Для визначення перерозподілу токсикантів з водної товщі до донних відкладень, на підставі отриманих результатів, розраховані коефіцієнти донної акумуляції (КДА) для нафтопродуктів, малої річки, що перебуває під постійним інтенсивним впливом авіапідприємств за формулою:

$$K_{ДА} = K_{д} / K_{в} \quad (1)$$

де  $K_{д}$  – концентрація токсиканта в донних відкладах  $\text{мг/дм}^3$ ;  $K_{в}$  – концентрація токсиканта в водній товщі,  $\text{мг/дм}^3$

Результати розрахунків коефіцієнтів донної акумуляції вказують на прогресуюче забруднення водної екосистеми та накопичення основної маси нафтопродуктів в донних відкладах (до стоку стічних вод – 675, в місці скиду стічних вод авіаційних підприємств – 966, після стоку, в місці розсіювання стічних вод – 1119). Прогресуюче забруднення малої річки характеризується зростанням коефіцієнтів донної акумуляції та зниження процесів детоксикації у водній товщі.

Мала р. Нивка є цілковито антропогенно навантаженою річкою, що втратила здатність до природних процесу самовідновлення. Дана мала річка, має свій об'єм –  $W_0 = Q$  ( $\text{м}^3$ ), до якого скидаються зворотні води комунально-побутових та промислових підприємств м. Києва з витратою  $q_1$  ( $\text{м}^3/\text{год}$ ) та концентрацією в них солей та мулу  $c_1$  ( $\text{г/л}$ ).

При цьому, в алгоритмі підвищення процесів самоочищення цієї річки необхідно враховувати коефіцієнт розбавлення та змішування солей та донних відкладень за певний час ( $\kappa$ ):

$$C_6(t) = c_1 + (c_0 - c_1) \exp\left[-\frac{t}{\tau_0}\right] \quad (2)$$

$$C_6^*(t) = c_1^* + (1 - c_1^*) \exp\left[-\frac{t}{\tau_0}\right] \quad (3)$$

якщо  $c_6^* = \frac{c_6}{c_0}$ ;  $c_1^* = \frac{c_1}{c_0} = \kappa$  – зведені величини, що визначають концентрацію солей у басейні

річки і зворотних водах через початкову концентрацію  $C_0$ ;

якщо  $\tau_0 = \frac{Q_0}{q_1}$  – час цілковитого відновлення води в басейні річки за умови не перемішування

води в басейні;

якщо  $\kappa = \frac{c_1}{c_0}$  – коефіцієнт розбавлення (розмішування).

За результатами розрахунку формул було отримано графік змін концентрації забруднювальних речовин за певний проміжок часу (рис. 1).

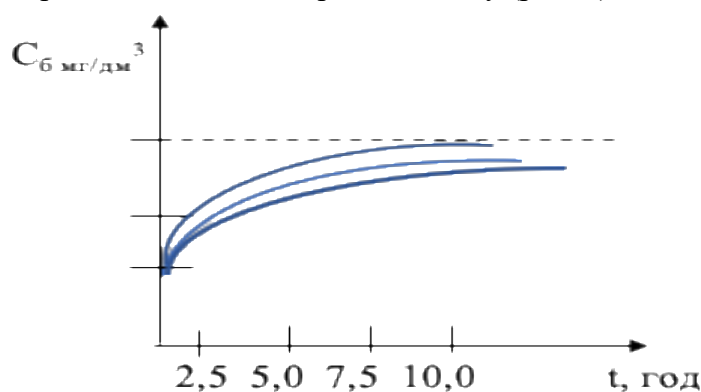


Рис. 1. Зміна концентрації забруднювачів за 2,5 год, 5 год, 10 год діапазон часу.

Fig.1. Change in pollutant concentration in 2,5 h, 5h, 10 h time range.

Також в процесі розрахунків був отриманий графік зміни забруднень в умовах розбавлення зворотних вод, які надходять до річки (рис. 2).

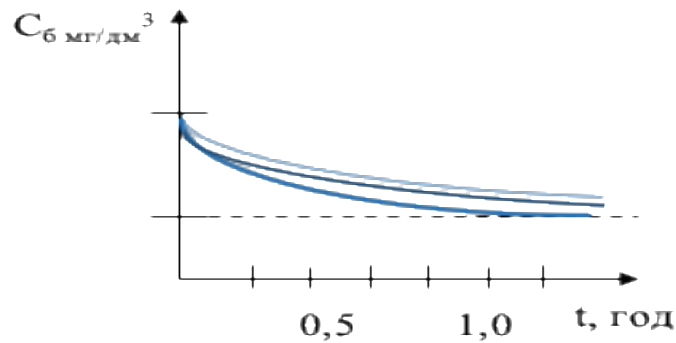


Рис. 2. Зміна концентрації забруднювачів з урахуванням їх розбавлення у поверхневій водоймі.

Fig.2. Change in the concentration of pollutants taking into account their dilution in the surface water body.

Даний математичний апарат дозволяє у часі охарактеризувати тенденцію погіршення процесу розвитку (еволюції) водної екосистеми, оскільки досліджувана малої річки розглядається в комплексному контексті як єдина складова – водні маси, донні відклади, біота.

**Висновки.** Донні відклади в гідроекосистемах протягом тривалого періоду акумулюють забруднювачі, що надходять до водойм і за рахунок цього є свосередним акумулятором”, накопичувачем забруднювачів, інтегральним показником рівня антропогенного забруднення – індикатором рівня екологічної небезпеки гідроекосистем. Донні відклади малої річки, що протікає вздовж авіапідприємств можна віднести до категорії “надзвичайно забруднених” і стверджувати, що вони з одного боку сприяють самоочищенню водного середовища, акумулюючи в собі нафтові вуглеводні, а з іншого боку являють собою небезпеку вторинного забруднення гідроекосистеми, оскільки при зміні фізико-хімічних умов придонних вод забруднювачі з донних відкладів здатні переходити у водну фазу.

#### Список використаних джерел:

1. Дудник С.В., Євтушенко М.Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне значення [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://nubip.edu.ua/sites/default/files/u104/Водна%20токсикологія-монографія.pdf>
2. Маджд С.М. Оцінка біотичного потенціалу водних екосистем в зоні впливу авіаційних підприємств / С.М. Маджд, А. С. Александрова, А.О. Панченко // Авіація в ХХІ столітті : VII Всесвіт. конгрес, 19-21 вересня 2016 р. : тези доп. – К., 2016. – С. 5.4.73–5.4.76.
3. Збільшення буферності природних підсистем з метою мінімізації антропогенного навантаження на гідроекосистеми / О.М. Міхєєв, В.М. Удод, С.М. Маджд, О.В. Лапань, Я.А. Кулініч // Східно-Європейський Науковий Журнал – Польща: – Варшава, 2016. – № 9 (13). – С. 10–13.
4. Черных Н.А. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере / Н.А.Черных, С.Н.Сидоренко – М.: Изд-во РУДН, 2003. – 430 с.
5. Методы исследования в гигиене воды. – М. : Изд-во Минздрав, 1983. – 89 с.
6. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. – К. : СИМВОЛ – І, 1998. – 28 с.
7. Методи гідроекологічних досліджень. – К. : Лібра, 2006. – 280 с.
8. Методи аналізу об'єктів довкілля: Метод. рек. / ред. А. Г. Волощук. – Чернівці : Рута, 2005. – 28 с.
9. Руководство по методам исследования качества вод / УНИИВЭП. – Т. 2 – К. : Токсикология, 1995 – 183 с.
10. Маджд С.М. Екологічна оцінка якості поверхневих і ґрунтових вод, в районі експлуатації та ремонту авіаційної техніки / С.М. Маджд, Г.М. Франчук, М.М. Тимошенко // Екологічна безпека та природокористування : зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт., НАН України, Ін-т телекомунікацій і глобал. інформ. простору. – К., 2012.– Вип.9. – С. 116–122.

11. Маджд С.М. Удосконалення технологічної схеми очищення зворотних вод авіапідприємств / С.М. Маджд // Проблеми водовідведення та гідраліки : наук.-техн. зб. – К.: КНУБА, 2013.– Вип.22. – С.107–112.
12. Маджд С.М. Оцінка техногенного впливу авіапідприємств на стан водойм / С.М. Маджд // Екологічна безпека та природокористування: зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт., НАН України, Ін-т телекомунікацій і глобал. інформ. простору. – К., 2014.– Вип.14. – С.101–106.
13. Ісаєнко В.М. Наукові основи розроблення системи екологічного управління техноекосистемою зони аеропорту / В.М. Ісаєнко, С.М. Маджд, Д.Д. Кальницька // Екологічна безпека та технології захисту довкілля. – 2019. – №2. – С. 35–39.
14. Маджд С.М. Визначення потенційної небезпеки донних відкладів гідроекосистем з інтенсивним техногенним навантаженням/ С.М. Маджд, А.С. Александрова, // Наукоємні технології. – 2016. – №3. – С. 331–334.
15. Маджд С.М. Матеріальна кумуляція донних відкладів басейнів рік техногенно трансформованих районів / С.М. Маджд // «Техногенно-екологічна безпека України: стан та перспективи розвитку» : VIII Всеукр. наук.-практич. Інтернет конф., 12-20 листопада 2018 р.: тези доп. – Ірпінь, 2018. – С. 252-256.
16. Удод В.М. Дослідження причин та наслідків трансформації техногенно змінених водних систем / В.М. Удод, С.М. Маджд, Я.І. Кулинич // Техногенна безпека. – 2017. – Т. 289. Вип. 277. – С. 10–16.
17. Маджд С.М. Механізми підвищення рівня екологічної безпеки гідроекосистем зони впливу авіаційних підприємств / С.М. Маджд, А.О. Панченко, Д.Д. Кальницька, А.М. Бондар // Проблеми екологічної безпеки: XV Міжнарод. наук.-техніч. конф., 11-13 жовтня 2017р. : тези доп. – Кременчук, 2017. – С. 47.
18. Маджд С.М. Структурно-функціональні зміни розвитку водних системи в умовах техногенної трансформації / С.М. Маджд // «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» : XIV Міжнарод. наук.-практич. конф., 14 вересня 2018р.: тези доп. – Львів, 2018. – С. 203.
19. Ісаєнко В.М. Теоретична концепція формування еколого-небезпечних ризиків в процесі розвитку техноприродних водних екосистем / В.М. Ісаєнко, С.М. Маджд // Вісник Кременчуцького національного університету. – 2019. – №1 (114). – С. 121–127.
20. Маджд С.М. Дослідження техногенно-зумовлених водних екосистем в зоні впливу авіапідприємств / С.М. Маджд, Я.І. Писанко // Вісн. НАУ. – 2018. – №3. – С. 78-86.

## References:

1. Dudnyk S.V., Yevtushenko M.Yu. Water toxicology: basic theoretical provisions and their practical significance [Electronic resource]. - Access mode: <http://nubip.edu.ua/sites/default/files/u104/Водна%20токсикологія-монографія.pdf>
2. Madzhd S.M. Assessment of the biotic potential of aquatic ecosystems in the zone of influence of aviation enterprises / S.M. Majd, A.S. Aleksandrova, A.O. Panchenko // Aviation in the 21st century: VII Universe. congress, September 19-21, 2016: abstracts – K., 2016. – P. 5.4.73–5.4.76.
3. Increasing the buffering capacity of natural subsystems in order to minimize anthropogenic load on hydroecosystems / O.M. Mikheev, V.M. Udod, S.M. Majd, O.V. Lapan, Ya.A. Kulinich // East European Scientific Journal – Poland: – Warsaw, 2016. – No. 9 (13). - P. 10–13.
4. Chernykh N.A. Ecological monitoring of toxicants in the biosphere / N.A. Chernykh, S.N. Sydorenko - M.: RUDN publishing house, 2003. - 430 p.
5. Research methods in water hygiene. - M.: Publishing House of the Ministry of Health, 1983. - 89 p.
6. Methodology of environmental assessment of surface water quality by relevant categories. - K.: SYMBOL - I, 1998. - 28 p.
7. Methods of hydroecological research. - K.: Libra, 2006. - 280 p.
8. Methods of analysis of environmental objects: methodological recommendations / edited by A. G. Voloshchuk. - Chernivtsi: Ruta, 2005. - 28 p.
9. Guide to water quality research methods / UNIIVER. - Vol. 2 - K.: Toxicology, 1995 - 183 p.
10. Madzhd S.M. Environmental assessment of the quality of surface and groundwater in the area of the quality of surface and repair of aircraft equipment / S.M. Majd, H.M. Franchuk, M.M. Tymoshenko // Ecological safety and nature management: coll. of science works / Ministry of Education and Science of

- Ukraine, Kyiv. national University of Civil Engineering and Architecture, National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Telecommunications and Global. information space - K., 2012. - Issue 9. - pp. 116–122.
11. Majd S.M. Improvement of the technological scheme for cleaning return waters of airline companies / S.M. Majd // Problems of drainage and hydraulics: science and technology. coll. - K.: KNUBA, 2013. - Issue 22. – P.107–112.
  12. Madzhd S.M. Assessment of man-made impact of airlines on the state of water bodies / S.M. Majd // Ecological safety and nature management: coll. of science works / Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv. national University of Civil Engineering and Architecture, National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Telecommunications and Global. information simply - K., 2014. - Issue 14. – P.101–106.
  13. Madzhd S.M. Determining the potential danger of bottom sediments of hydroecosystems with intensive man-made load/ S.M. Majd, A.S. Aleksandrova, // Science-intensive technologies. – 2016. – No. 3. - P. 331–334.
  14. Madzhd S.M. Material cumulation of bottom sediments of basins in the year of technogenically transformed areas / S.M. Madzhd // "Technological and ecological safety of Ukraine: state and prospects of development" : VIII Vseukr. scientific and practical Internet conference, November 12-20, 2018: abstracts of add. - Irpin, 2018. - P. 252-256.
  15. Madzhd S.M. Material cumulation of bottom sediments of basins in the year of technogenically transformed areas / S.M. Madzhd // "Technological and ecological safety of Ukraine: state and prospects of development" : VIII Vseukr. scientific and practical Internet conference, November 12-20, 2018: abstracts of add. - Irpin, 2018. - P. 252-256.
  16. Udod V.M. Study of the causes and consequences of the transformation of man-made water systems / V.M. Udod, S.M. Majd, Y.I. Kulynych // Technological safety. – 2017. – Volume 289. Issue 277. – P. 10–16.
  17. Majd S.M. Mechanisms of increasing the level of ecological safety of hydroecosystems in the zone of influence of aviation enterprises / S.M. Majd, A.O. Panchenko, D.D. Kalnytska, A.M. Bondar // Problems of ecological safety: XV International. science and technology conference, October 11-13, 2017 : theses add. – Kremenchuk, 2017. – P. 47.
  18. Madzhd S.M. Structural and functional changes in the development of water systems in the conditions of man-made transformation / S.M. Majd // "Ecological safety as the basis of sustainable development of society. European experience and perspectives: XIV International. scientific and practical conference, September 14, 2018: theses add. - Lviv, 2018. - P. 203.
  19. Isaenko V.M. Theoretical concept of the formation of ecologically dangerous risks in the process of development of techno-natural water ecosystems / V.M. Isaenko, S.M. Majd // Bulletin of the Kremenchug National University. – 2019. – No. 1 (114). - pp. 121–127.
  20. Majd S.M. Research of man-made aquatic ecosystems in the zone of influence of aircraft companies / S.M. Majd, Y.I. Pysanko // Visn. NAU – 2018. – No. 3. - P. 78-86.

UDC621.039.58

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0414>**Olena Zhukova**

PhD, associate professor of the department of technologies of environmental protection and labor protection, Kyiv National University of Construction and Architecture,

31, Air Force Prospect, Kyiv, Ukraine, 03037

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0662-9996>

E-mail: [elenazykova21@gmail.com](mailto:elenazykova21@gmail.com)

**Nazariy Negoda**

graduate student of the department of environmental protection technologies and labor protection Kyiv National University of Construction and Architecture,

31, Air Force Prospect, Kyiv, Ukraine, 03037

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0082-6027>

E-mail: [nehoda\\_nv@knuba.edu.ua](mailto:nehoda_nv@knuba.edu.ua)

## **DETERMINATION OF CAUSE-CONSEQUENTIAL CHANGES IN THE MECHANISM OF BIOTIC SELF-REGULATION OF WATER BODIES BY URBOECOSYSTEMS (ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF KYIV, UKRAINE)**

**ABSTRACT.** *Deterioration of the ecological condition of the surface waters of the land is due to the qualitative and quantitative depletion of the factors of their formation, which in some cases makes their use for economic purposes impossible. The intensity of pollution of individual components of the biosphere depends on the migration of pollutants, their transformation, destruction and accumulation. All obtained research results allow us to affirm the main provisions of the mechanism of biotic self-regulation of the water basin. Conceptually, this approach is an integrative trend of preserving the stability of the development of hydroecosystems due to the restoration of the ecological and functional inseparability of the unity of the water ecosystem as a mutually conditioned necessity for its further development. It is the environment-forming role of biota under the conditions of interrelationships of environmental and specific modifying factors with consistent adaptation.*

**Keywords:** *urban ecosystem, biotic self-regulation, water bodies, environmental safety, pollution, pollutants, technogenic flows, anthropogenic load*

**Introduction.** The most important component of the ecologically safe development of natural and socio-economic systems is such nature management, which involves the organization of the use of water resources, in which sustainable development is ensured and sufficient water resource potential is preserved for a long time. The 19th century was characterized by significant negative changes in the natural environment caused by the uncontrolled use of natural resources, the development of industry and transport, which led to an increase in water consumption and, at the same time, an increase in its pollution. This became especially noticeable during the last 50 years, when human influence on the planet's water cycle reached a global scale.

Deterioration of the ecological condition of the surface waters of the land is due to the qualitative and quantitative depletion of the factors of their formation, which in some cases makes their use for economic purposes impossible. Thus, the statistical characteristics of water drainage in Ukraine indicate that there is pollution of water basins of rivers due to irrational use of nature, the consequence of which is a violation of their environmentally safe development. At the same time, in recent decades, the opinion of leading environmental scientists has appeared that the problem can be solved thanks to the elucidation of the mechanism of biotic self-regulation and its use for predictive purposes regarding the characteristics of the level of ecological stability of the development of water basins of rivers. But these are still declarative principles, although they have a scientific basis thanks to the known role of biota in ensuring the sustainable development of natural systems. It is these questions that became the subject of dissertation research and will contribute to the scientific

substantiation of acceptable eco-safe changes in the hydroecosystems of river basins, which will allow establishing the permissible limits of man-made load on water systems.

World forums (Rio de Janeiro, 1992; Johannesburg, 2002) have confirmed that the sustainable development of socio-economic systems is connected with the success of environmental protection activities. At the same time, at the current stage of the development of the biosphere, all its components are subject to significant technogenic influence [1-7]. The total mass of the modern human economy and products of the technosphere is 140 Gt/year annually (emission into the atmosphere – 35 Gt/year, discharge into water bodies – 15 Gt/year, placement on the surface of the earth – 90 Gt/year). Man-made pollutants (pollutants) belong to different classes of danger, in quantitative terms they amount to 250-300 kg for every inhabitant of the planet. Man-made load on the environment leads to pollution with toxic compounds: first, heavy metal ions that have been stored in natural systems for a long time; secondly, substances of synthetic origin (xenobiotics) that were not available to them before, etc. Biotic processes of their detoxification require a long time for their disinfection due to the lack of adaptive mechanisms of the biota.

Among the current measures related to the preservation of ecologically safe development of hydroecosystems of water basins of rivers, one of the key values is production and economic regulations [1], which limit the activity of one or another production to a certain amount in return waters (the content of harmful substances, the amount of suspended particles, biochemical oxygen consumption, active water reaction, concentration of acids and bases, etc.). The conditions for draining return water into water bodies are established taking into account possible mixing and dissolution, background water quality [2].

**Materials and methods.** In order to find out the changes in the cause-and-effect relationships between biotic, abiotic and anthropogenic factors during the transition of natural hydroecosystems to the state of natural-anthropogenic ones, we took into account the following methodological approaches to their research:

- 1) Establishment of scientific regularities of the development of water ecosystems taking into account the system-basin principle [6];
- 2) Carrying out an ecological assessment [7,8] of the state of hydroecosystems of the water basin;
- 3) Creation of an information control program using engineering and environmental indicators and their parameters;
- 4) Adjustment, on the example of water basin studies, of the requirements for discharge of return water into surface reservoirs.

The program of information control of the ecological state of the water basin is presented in fig. 1. At the same time, it should be noted that technical indicators characterize the effect of pollution sources in their interaction with water resources in the process of their use, economic indicators show their use, and ecological indicators show the state of water resources and their ability to self-renew.

The intensity of pollution of individual components of the biosphere depends on the migration of pollutants, their transformation, destruction and accumulation. It is known from the scientific literature that in man-made flows of pollutants, the key place is occupied by the environments that transport them (Fig. 2).

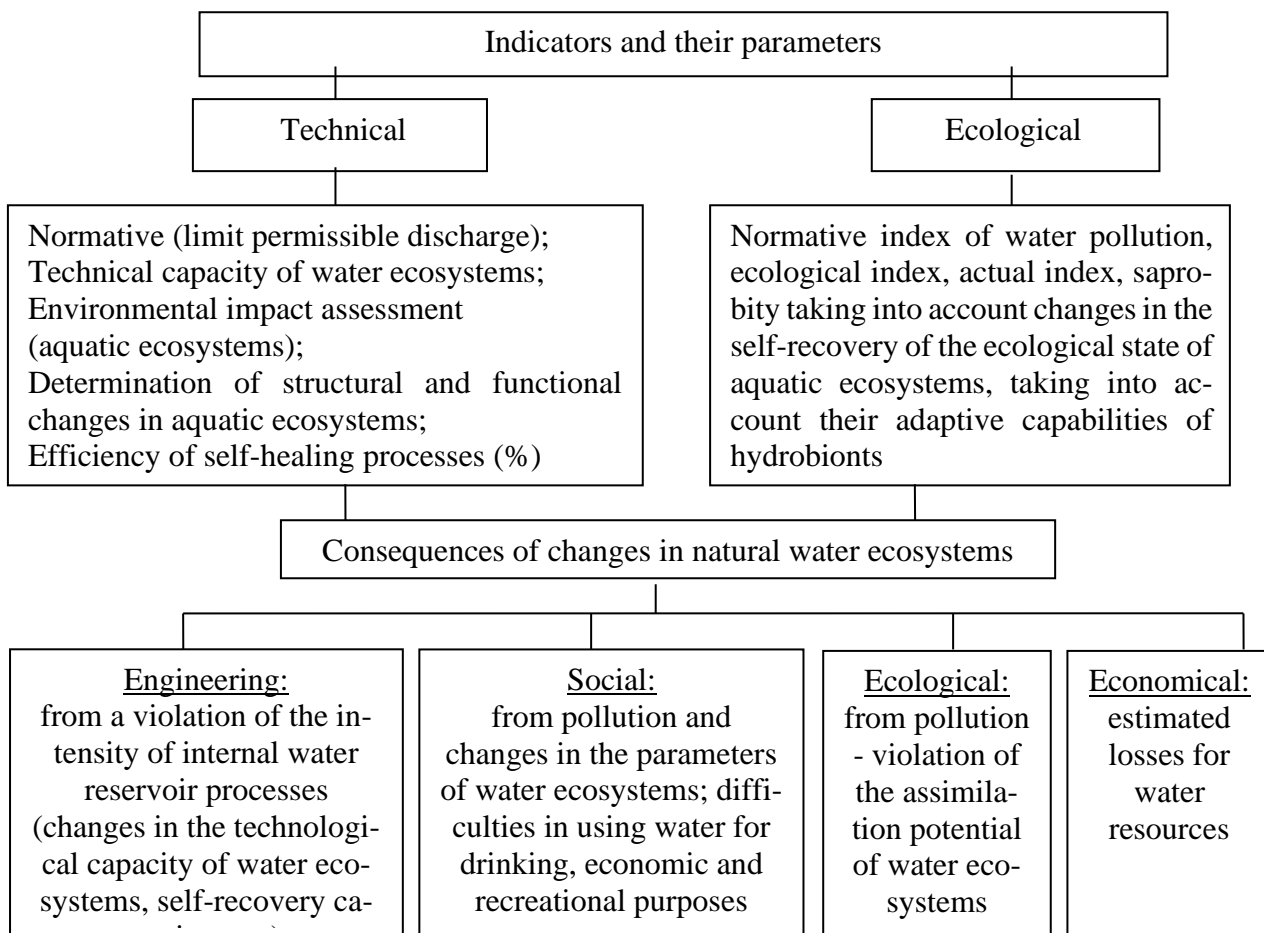
Heavy metals occupy a prominent place among environmental pollutants. The danger of contamination of natural systems with heavy metals is explained by the fact that they are eternal and do not destroy when using traditional technologies for their disinfection, but only pass from one form of existence to another, for example, they are included in the composition of salts, oxides, organometallic compounds, chelates, etc.

In the XX-XXI centuries. so-called priority ecotoxicants appeared within the biosphere [8] – the most toxic xenobiotics for natural systems, which are characterized by the ability to accumulate in trophic chains [9,10], ecotoxic stability in the natural environment. Among the indicators of toxicity for humans, the authors note: carcinogenicity, mutagenicity, reproductive and endocrine

status of exposure, etc. Heavy metals, volatile phenols, synthetic surfactants, and petroleum products are among the priority xenobiotics found in the water basin [11].

Pollution of individual components of the biosphere depends on the migration of pollutants, their transformation, destruction and accumulation. According to the sources of scientific literature, it is known that in man-made pollutant flows, the environment that transports them (atmospheric air and water) plays a decisive role.

Heavy metals occupy a prominent place among environmental pollutants. The danger of contamination of water systems with heavy metals is explained by the fact that they are not destroyed when using traditional technologies for their disinfection, but only change from one form to another. Heavy metals are characterized by different toxic effects on living organisms: low - Cu, Mn, Fe, Zn, Ni, Sr, Rb, Sc; medium - Cr, Ag, Al; high - Sb, As, Ba, Se; very high - Be, Cd, Pb, Hg, Ti.

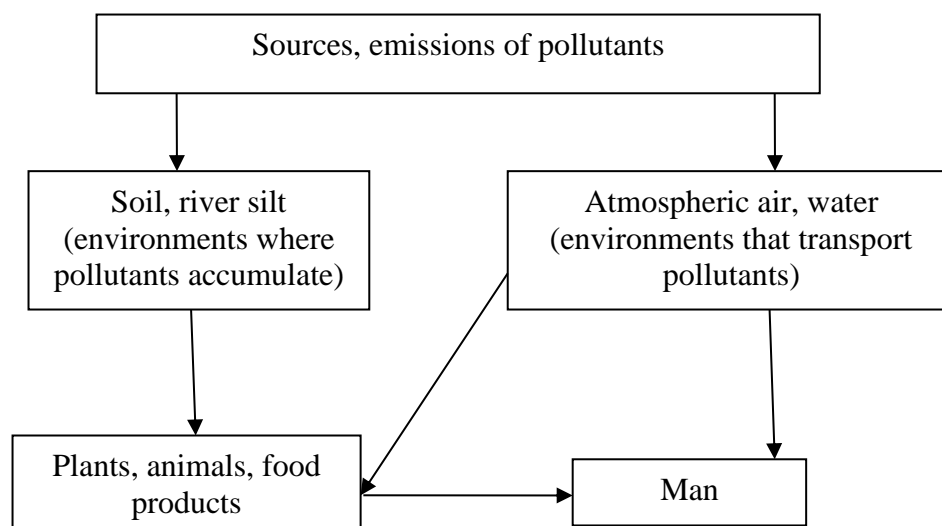


**Figure 1.** Program of information monitoring of the state of water ecosystems

The toxic properties of heavy metals have special effects:

- the toxicity of the element depends on the chemical form in the aqueous environment and in the living cell, for Hg it increases significantly in the series:  $Hg_2Cl_2 < HgCl_2 < CH_3Hg < (CH_3)_2Hg$
- the content in the environment of elements with high biophilicity for living organisms has a positive value;
- when technogenicity is higher and biophilicity of an element is lower, it becomes more dangerous for biota;
- with an increase in the environment of elements with low biophilicity, the functions of organisms and the entire biological system are also disrupted;
- a certain concentration is necessary for the manifestation of a toxic effect;
- in the water environment, Cd, Pb, and Hg dominate as poisonous metals.





**Figure 2.** Technogenic flows of pollutants

Under the influence of substances of anthropogenic origin (specific modifying (anthropogenic) factors), the process of transformation of hydroecosystems takes place, which can schematically be represented as a sequence of certain stages [2, 11]:

- when the water technogenic load exceeds the maximum allowable concentrations for individual and total indicators (by 1.5-2.5 times), the chemical composition of water changes, which subsequently leads to changes in indicators that characterize the state of hydrobiocenoses [11], but the main ones remain structural parameters of self-organization of hydroecosystems;
- the structural reconstruction of hydroecosystems begins when the man-made load exceeds the maximum allowable concentrations by 3-5 times;
- at the stage of the appearance of degradation processes of water systems (when the maximum permissible concentration is exceeded by 6-7 times), the biological structural organization of hydroecosystems changes, the self-regulating ability decreases;
- at the stage of qualitative depletion of water systems (exceeding the multiplicity of maximum permissible concentrations in relation to the "background" state by 10 times), not only the self-regulating capacity, but also the assimilative capacity, etc., decreases.

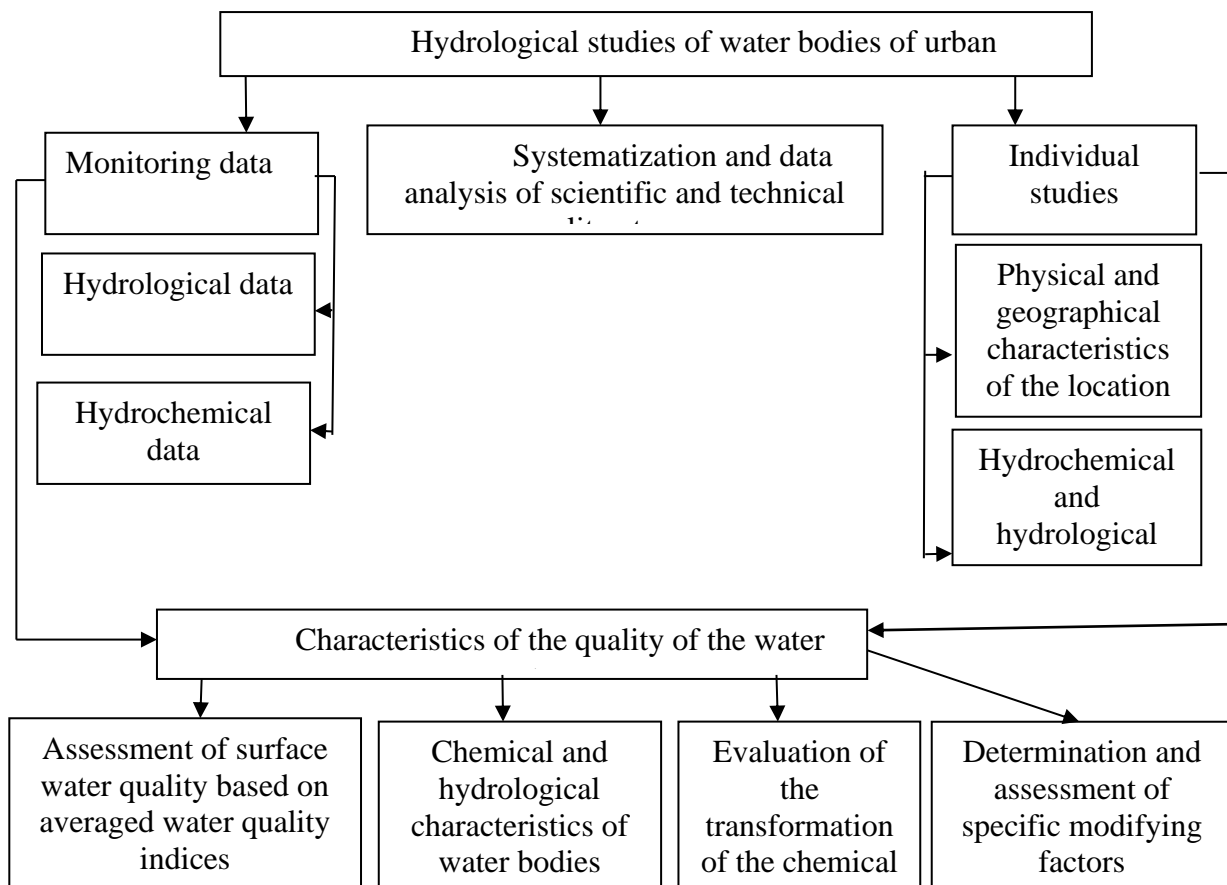
Thus, as a result of the action of modifying factors, taking into account our data, the following processes occur [9]:

- when exceeding the maximum allowable concentration of pollutants at the first stage, the chemical composition of water systems changes as a result of the pollution of the water basin;
- the effect of ecotoxicants on the biota is manifested in two opposite trends: the harmful effect of pollutants and the adaptive reactions of hydrobionts to changes in their habitat [12-15];
- the level of intoxication of biota depends on such factors as the physical and chemical structure of pollutants, toxicity, concentration and time of their action, the ecological state of aquatic ecosystems at the time of action of xenobiotics, the intensity of intra-aquatic processes;
- violation of the dynamic equilibrium of hydroecosystems due to the action of specific modifying factors;
- violation of the structural and functional self-organization of water ecosystems in the process of their development;
- violation of the environmentally safe development of the water basin due to the advantages of degradation processes over the assimilative capacity of water ecosystems.

Hydrochemical monitoring data for each water body are grouped according to the season. This approach will make it possible to form homogeneous data series and calculate average values.

Under the influence of anthropogenic load, surface waters change their natural physico-chemical properties, therefore ecological assessment is the main condition that allows assessing the

ecological state of water bodies, identifying the main water management and ecological problems, determining the main directions of nature use in river basins and substantiating the feasibility of recommendations regarding improvement of the ecological state of water bodies [16].



**Figure 3.** Algorithm of complex research of aquatic ecosystems

Anthropogenic exchange, unlike the biotic cycle, has an open nature: natural resources are at the input of the anthropogenic cycle, and industrial and economic wastes are at the output. The ecological imperfection of the anthropogenic exchange of material substances is that the coefficient of useful use of natural water resources is very small and therefore production waste changes the natural environment.

One of the conditions for achieving ecological safety of water ecosystems is the development and implementation of a complex of regional environmental standards, requirements, rules, as well as the creation of geo-informational systems to support management decision-making in economic practice.

In Ukraine, for the assessment and prevention of harmful anthropogenic influence on water bodies, a number of normative documents have been developed, which are based on a comparison of the concentrations of pollutants with normative indicators, based on these comparisons, a conclusion is drawn about the ecological state of water bodies [17-19].

To determine the prerequisites for the action of modifying anthropogenic factors on changes in the mechanism of biotic self-regulation, several water bodies of the Dnipro River were selected, the development of which occurs under different conditions of man-made load (Table 1).

As shown by the results of the influence of modifying factors on the natural water ecosystems of the Dnipro, they turned into natural-anthropogenic systems with changed structural and functional properties [20] due to the occurrence of degradation processes and gradual qualitative depletion in them. We have shown that the development of the water systems of the Dnipro is determined by the following main trends:

- internal features of the development of water ecosystems, related to ecotoxicokinetic processes in water systems and its components, which characterize their assimilative and self-regulating ability;
- external features of the influence of anthropogenic factors on aquatic ecosystems, which are related to ecotoxicodynamic processes [6] and characterize the level of man-made load on the aquatic environment;
- the defining principle of water basin development is the functional interrelationships and interdependencies between ecological and anthropogenic factors;
- the stable state of aquatic ecosystems depends on the ratio of biotic potential and resistance of the abiotic environment, which act in opposite directions.

At the same time, it should be stated that ecosystem evolution is associated with the constant action of modifying factors, with negative changes in the environment-forming function of biota (Table 1), when the ability of hydrobiocenoses to maintain the stability of the functioning of the water basin deteriorates (Tables 2, 3) on the border of the marginal ecological containers

**Table 1** - Generalized complex hydrochemical indicators of state assessment

Calculated hydraulic reservoirs	Water pollution index	Classes of pollution of the water system	Water quality indices				Technical capacity index	Intensity index of intrareservoir processes	Self-cleaning coefficient		
			Index of pollution by components of the salt composition (I <sub>1</sub> )	Ecological and sanitary index (I <sub>2</sub> )	Index of specific indicators of toxic action (I <sub>3</sub> )	Ecological index (I <sub>e</sub> )			Low (0-0,35)	Average (0,36-0,70)	High (0,71-1,0)
The city of Kyiv	1,65	polluted	1,33	3,44	3,67	2,81	0,2	0,36	18,51	70,44	11,05

Regarding the changes in biological and physiological features that ensure the ecological functions of hydrobiocenoses in aquatic ecosystems, which occur in the direction of improving the chances of their survival due to the mechanism of metabolic adaptations in hydrobionts. Given this course of development of aquatic ecosystems, we found that in the process of forming adaptive mechanisms in the biota, it is not so much the preservation of the constancy of their composition that is important, but rather the constancy of their functions.

First of all, the cause-and-effect changes in the relationships between environmental and anthropogenic factors were clarified and it was shown that in the conditions of the SMF action and in the process of formation of the biota mechanism of adaptation to them, functional dependence of hydrobionts regarding assimilative and self-regulating functions is preserved.

In order to exclude the parallel (combined) influence of the abiotic environment, we chose an object located in different physical and geographical zones (Carpathians, Prykarpattia, plain territory) - the Prut water basin. Analyzed and systematized environmental monitoring data (hydrological, hydrochemical, hydrobiological data) over the past 10 years for 3 reservoirs and obtained the following results: abiotic factors practically do not affect changes in relationships and their functional dependence between environmental and anthropogenic factors. The method of identifying the

self-healing capacity under the conditions of the effect of modifying factors on the Prut water basin using bioindicators has been patented and a patent for a useful model has been obtained [21].

**Table 2** - Generalized hydrobiological indicators of water basin condition assessment

Calculated hydraulic reservoirs	Saprobity index	The number of the main groups of biota ( $10^3$ cells/ml)/biomass, mg/dm <sup>3</sup>	Number of species in the group	The number of saprophytic bacteria, cells/dm <sup>3</sup>	Index of changes in the structural self-organization of aquatic ecosystems	Shannon index by biomass
The city of Kyiv	0,15	0,678/1,072	12	hundreds-thousands	0,38	6,97

In addition, it should be noted that preservation of self-regulatory ability is not possible without preservation of assimilative ability. Thus, the main functional properties related to the preservation of the mechanism of biotic self-regulation are not disturbed. In the future, similar studies were carried out for aquatic ecosystems (Table 3) and similar results were confirmed. The method of identifying the self-recovery ability of a water basin is a complex method, which uses total indicators (biological and chemical oxygen consumption), indicator indicators (saprobability index, taking into account the self-cleaning coefficient, etc.).

Effectiveness of self-healing ability ( $E_{\text{ef}}$ ) is determined by the formula [21]:

$$E_{\text{ef}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{kp}} \cdot K_{\text{cr}} \cdot I_c \quad (1)$$

where:  $N_{\text{kp}}$  - the multiplicity of the excess of chemical oxygen consumption and biological oxygen consumption in relation to the maximum permissible concentration;  $K_{\text{cr}}$  - coefficient of resistance to anthropogenic load;  $I_c$  - modified saprobability index.

Taking into account the fact that the development of aquatic ecosystems takes place in dynamic conditions and changes in time and space, we found out the functional and structural changes of aquatic ecosystems under the influence of modifying factors (Fig. 4).

Data analysis of fig. 4 allows us to state the fact that the mechanism of readaptive reconstruction of biota (hydrobiocenoses) characterizes the role of the mechanism of biotic self-regulation of natural-anthropogenic ecosystems at different functional levels of the development of aquatic ecosystems. And quantitative indicators (P) characterize the environmentally safe development of aquatic ecosystems, taking into account the self-regulating ability of aquatic ecosystems.

All the results obtained in relation to the research allow us to confirm the basic provisions of the mechanism of biotic self-regulation of the water basin. Conceptually, this approach is an integrative trend of preserving the stability of the development of hydroecosystems due to the restoration of the ecological and functional inseparability of the unity of the water basin as a mutually determined necessity for its further development. It is the environment-forming role of biota under the conditions of interrelationships of environmental and modifying factors with successive adaptation (a zone of aquatic ecosystems with practically intact structural and functional features of their development, an area above the city where water is taken for centralized water supply - 1 km above the city) reconstruction of hydrobiocenoses, which ensures the stability of their functions.

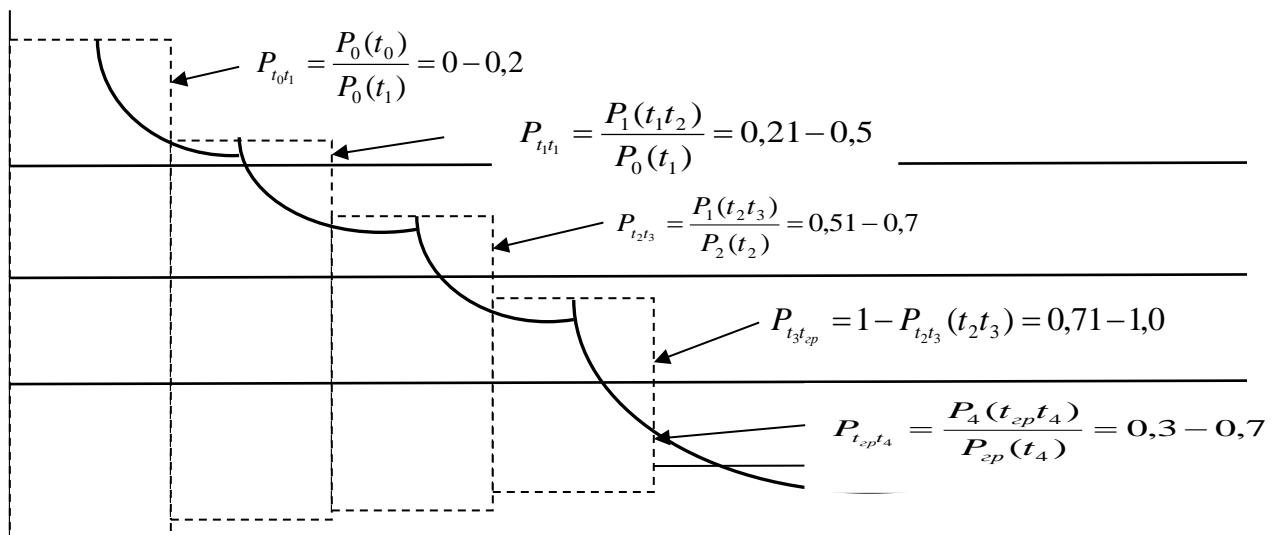
**Table 3** - Generalized parameters and their indicators, which characterize the level of stability of the development of hydroecosystems

Calculated water reservoirs	Man-made load on hydrobiocenoses (according to the Shannon index) taken into account	index changes saprobity	0,15							
		changes in the technical capacity index	0,2							
		changes in the index of structural self-organization	0,258							
	Factors of formation of the mechanism of biotic self-regulation of aquatic ecosystems	Sustainability of the development of aquatic ecosystems (L <sub>F</sub> )	2,8	0,71	8	0,11–0,24	0,8			
		Dynamic equilibrium of aquatic ecosystems (S <sub>F</sub> )								
		Vitality water ecosystems (R <sub>F</sub> )								
		Optimal level self-organization of water ecosystems (C <sub>F</sub> )								
		Safe ecological development of water ecosystems (P <sub>F</sub> )								
	Characteristics of the state of water ecosystems		The intensity of technogenic influence is less than the adaptive capabilities of aquatic ecosystems; high resistance to man-made load			0,35-1,0	0,71-1,0	4,2		
			Modified saprobity index		Coefficient of self-recovery ability of water ecosystems		Ability to self-clean, %			

This conclusion is consistent with the Le-Chatelier-Brown law, when under the influence of modifying factors, the dynamic balance in aquatic ecosystems shifts to the zone of the least man-made load, which allows for the formation of an adaptive (readaptive) mechanism in the biota, as a result of which the mechanism of biotic regulation of the water basin is preserved.

All obtained research results allow us to state the following. It is known that river basins, the water of which is used for centralized water supply, in the catchment area of which water ecosystems are preserved, practically, not anthropogenically disturbed (above the city), where due to the action of the mechanism of biotic co-regulation, adaptation of the biota to low concentrations of pollutants occurs, which allows to preserve the local their ecostabilizing role for hydroecosystems [22]. Equilibrium-dynamic status of water basin systems, at different levels of spatio-temporal structural self-organization, which water ecosystems provide for water basin conditions for their environmentally safe development.

Thanks to this parameter, it can be concluded that biotic self-regulation provides potentially relatively dangerous conditions for the energetic (thermodynamic) and trophic status (assimilative capacity) of aquatic ecosystems. In view of this, the processes of formation and dynamics of the structure of hydrobiocenoses change significantly.



**Figure 4.** Scheme of functional transitions in the development of aquatic ecosystems by stages of anthropogenic changes:

*I – the zone of the initial (background) state of water ecosystems; II – the zone of appearance of moderate local changes in the development of aquatic ecosystems; III – the zone of powerful anthropogenic changes within the maximum effect of modifying factors; IV – the zone of restoration of the self-regulating ability of water ecosystems*

Concentrations of pollutant substances of anthropogenic origin during their impact on biota are related to each other by a simple relationship (Hubber's equation): small concentrations of pollutants over a long time ultimately affect the stability of aquatic ecosystems in the same way as large concentrations over a short time. In addition, we have shown that the final result of biota intoxication depends on the combination of natural and anthropogenic factors that affect the change in the abiotic environment and lead to changes in physicochemical factors according to the following parameters: dissolved oxygen content, salt composition, pH, temperature, etc. One of the manifestations of such changes, for example, the water temperature activates, and when it increases, on the contrary, the enzymatic activity of the biota is suppressed, which is associated with the provision of bioenergetic processes in hydrobionts, and oxygen deficiency develops especially acutely against the background of intoxication.

The salt composition also significantly affects the level of toxicity of specific pollutants (Table 1). In connection with this, functional transitions (Fig. 1), which are associated with changes in environmental environmental factors in areas from, practically, the background state of aquatic

ecosystems through water flow zones with varying degrees of man-made transformation and to areas characterized by a moderate degree pollution. The fact that the assimilative and self-regulating capacity in relatively "clean" sections of the water flow is within the ecological capacity of water ecosystems, it can be noted that the mechanism of biotic self-regulation is not disturbed (Fig. 3). This is possible due to functional relationships between individual organisms of hydrobiocenoses and, in general, between biotic and abiotic factors. It is precisely to assess the consistency of inter-relationships of factors that there is such a concept as "ecological capacity of ecosystems" - one of the components of biotic regulation. Under such conditions, a common type of relationship in aquatic ecosystems that affects the mechanism of biotic self-regulation is symbiosis, in which hydrobiont organisms better adapt to the environmental conditions of aquatic ecosystems.

Conditional possibilities of the transition of aquatic ecosystems from one state to another depend (Fig. 3) on structural and functional changes in aquatic ecosystems that change the ecological situation in them [23]:

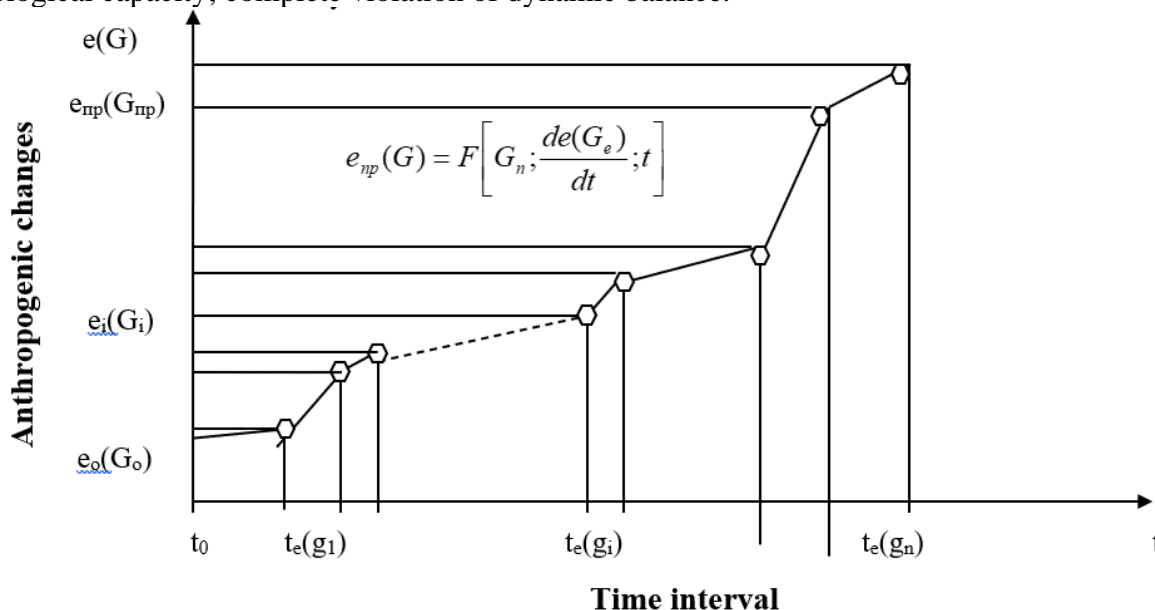
$P_0 \rightarrow P_{t_0 t_1}$  - the transition of aquatic ecosystems from one state to another without significant anthropogenic changes in them; dynamic balance is not disturbed;

$P_1 \rightarrow P_{t_1 t_2}$  - the transition of aquatic ecosystems to a state characterized by minor anthropogenic changes -  $\Delta g$ ; conditionally balanced state;

$P_2 \rightarrow P_{t_2 t_3}$  - the transition of aquatic ecosystems from the initial anthropogenic changes -  $\Delta e_1$  in a state with the level of anthropogenic changes, respectively, of natural and anthropogenic ecosystems;

$\Delta e_2$  ( $\Delta e_2 > \Delta e_1$ ) – local disturbance of dynamic equilibrium;

$P_3 \rightarrow P_{t_3 t_{sp}}$  - the transition of aquatic ecosystems to a limit state on the verge of breaking the ecological capacity; complete violation of dynamic balance.



**Figure 5.** The process of accumulation of anthropogenic changes in aquatic ecosystems

We have proposed another stage of the development of aquatic ecosystems, which is characterized by the process of partial self-regeneration, namely:  $P_4 \rightarrow P_{trp^4}$  - restoration of dynamic balance.

The main toxicokinetic dependencies include the accumulation of ecotoxicity in biota with subsequent biotransformation (Fig. 5). In fig. 5 shows a geometric interpretation of the influence of modifying factors in different zones of the river's water flow. The real progress and development of natural-anthropogenic water systems is accompanied by the natural accumulation of pollutants (g) and anthropogenic changes in hydrobiocenoses (biota) or properties of water ecosystems (e) under the influence of ecotoxicodynamic factors.

Therefore, the mechanism of formation of water ecosystems does not cause contradictions in the scheme of accumulation of man-made changes, namely:

$$e(G_e) = e(g_1) + e(g_2) + \dots + e(g_i) + e(g_n) \quad (2)$$

where:  $e(G_e)$  - each time interval  $\Delta t$  correspond to an increase in anthropogenic changes in aquatic ecosystems (Fig. 5);  $g_1, g_2, g_i, g_n$  - local anthropogenic changes (which are random variables).

As a result of the interaction of environmental and anthropogenic factors, the transition from the initial stage of development, through the intermediate, to the limit, which is characterized by a critical level of accumulation of anthropogenic changes, namely:

$$t_{np} = \sum_{i=1}^n t_{e(g_i)} = t_{e(g_1)} + t_{e(g_2)} + \dots + t_{e(g_n)} \quad (3)$$

That is, the physical content of the ecological security of the state consists of a sequential summation of the time of transition of systems from one stage to the next and is decided on the basis of the product of probabilities. The probability of an ecologically balanced state of aquatic ecosystems with the accumulation of anthropogenic changes in it is determined  $P_{G_\Sigma}(t)$ , and the probability of maintaining a dynamic equilibrium state from  $t=t_0$  over the studied periods (hydraulic reservoirs) to  $t$  – through  $P(t)$ , then the probability of accumulation of anthropogenic changes in water bodies [23]  $\sum_{i=1}^n g_i$  is equal to:

$$P\left(\frac{G_\Sigma}{t}\right) = \frac{P_{G_\Sigma}(t)}{P(t)} \quad (4)$$

This course of determination allows us to establish the nature of the spread of anthropogenic changes in water ecosystems. That is, each time interval  $t$  corresponds to an increase in the accumulation of anthropogenic changes in aquatic ecosystems - and the probability that it will occur in the interval considered  $dt$ . In this way, a chain of mutual correspondence arises -  $e(G_e)$  and the probability that it will occur in the interval considered  $dt$ . In this way, a chain of mutual correspondence arises  $dt \rightarrow \Delta e(G_e) \rightarrow \Delta P$  to the sustainable functioning of aquatic ecosystems and is characterized by the following equations:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= P(t + dt) - P(t) \\ \Delta e(G_\Sigma) &= e(t + dt) - e(t) \\ \Delta G\left(\sum_{i=1}^n g_i\right) &= G(t + \Delta t) - G(t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

The general form of equation (1) has the following form in relation to the ecological stability of the state of aquatic ecosystems:

$$\Delta P = -\mu_e \Delta e(t) \quad (6)$$

where:  $\mu_e$  - coefficient that depends on the intensity of accumulation of anthropogenic changes in water ecosystems  $\left[ \mu_e = f\left(\frac{de(G_e)}{dt}\right) \right]$ .

**Conclusions.** Thus, the obtained research results allow us to adequately and reliably assess the role of the mechanism of biotic regulation of the water basin, taking into account the fact that we took into account the established cause-and-effect changes in the assimilative and self-recovery abilities and biotic self-organization of the water basin over a long-term period, taking into account the ecological approach and basin principle.



**References:**

1. National report on the state of the natural environment in Ukraine in 2020 [Electronic resource]. - Access mode: <http://menr.gov.ua/index.php/dopovidi>.
2. Myslyuk O. 2012. Fundamentals of chemical ecology. Kyiv, Ukraine.
3. Udod V., Trofimovich V., Voloshkina O., Trofimchuk O. 2007. Technoecology. Kyiv, Ukraine.
4. Vasyukov A., Blank A. 2007. Chemical aspects of the environmental safety of surface waters. Kharkiv, Ukraine.
5. Tyler Miller Vr. 2002. Ziving in the environment (Priciples, Connections, and Solutions) Wadsworth. USA.
6. Udod V., Trofimovich V., Voloshkina O. 2008. Basics of ecotoxicology. Kyiv, Ukraine.
7. Vasyukova G., Grosheva O. 2009. Ecology. Kyiv, Ukraine.
8. Udod V., Yatsiv M. 2013. Priority ecotoxicants and their impact on the natural environment. Kyiv, Ukraine.
9. Udod V., Wildman I., Zhukova O. 2014. An ecological approach in assessing the efficiency of intra-reservoir processes of the water systems of the Kalmius and Ingulets rivers. Bulletin of Kremenchug National University named after Mykhailo Ostrogradskyi, 2(85), 161 – 166.
10. Udod V., Zhukova E. 2015. Regional-ecological approach to the assessment of possible consequences of pollution of the Kalmius river basin, 1 (37), 93-99.
11. Sukharev S., Chundak S., Sukhareva O. 2006. Basics of ecology and environmental protection. Kyiv, Ukraine.
12. Romanenko V. 2001. Basics of hydroecology. Kyiv, Ukraine.
13. Grubinko V. 2001. Systematic evaluation of metabolic adaptations in hydrobionts. Scientific notes of Ternopil State University named after V. Hnatyuk. Series: Biology. Special issue: Hydroecology, 4(15), 36-39.
14. Protasov A. 2012. On the relationship between biodiversity and structural indicators of communities and hydrobionts. Biology of inland waters, 4, 5-10.
15. Yatsik A., Hopchak I. To ecological assessment of surface water quality. 1st All-Ukrainian Congress of Ecologists: International Scientific and Technical Conference, October 4–7, 2006, 105.
16. DBN A.2.2-1-2003. The composition and content of EIA materials during the design and construction of enterprises, completed, constructed. Access mode: <http://info-build.com.ua/info/dbn-detail.php?ID=21284>.
17. Water Code of Ukraine. Information of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 1995, No. 24, Article 189. Access mode: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>.
18. Law of Ukraine "On Environmental Protection" Law dated 06.25.1991 No. 1264-XII. Access mode: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>.
19. Udod V., Zhukova O. 2014. Development of hydroecosystems of the Kalmius River under the influence of specialized modifying factors. Environmental security, 2 (18), 75-82.
20. Udod V., Yatsiv M., Zhukova O. Utility model patent 88143. A method of identifying the self-healing capacity of the Prut River (UA). Application No. a 2013 09888 dated 09.03.2013.

УДК 621.039.58

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0415>**Володимир Ващенко,**

доктор фіз.-мат. наук, заступник директора,  
Міжвідомчий науковий центр енергетики і екології  
Національного університету «Одеська політехніка»  
просп. Шевченка1, м. Одеса, 65044, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-2129>  
E-mail: [nucleoroid@gmail.com](mailto:nucleoroid@gmail.com)

**Ірина Кордуба,**

доктор технічних наук,  
доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна,  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465>  
E-mail: [uaror-korduba@ukr.net](mailto:uaror-korduba@ukr.net)

**Сергій Цибитовський**

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1313-9988>  
E-mail: [serhii.uaror@gmail.com](mailto:serhii.uaror@gmail.com)

**ЯДЕРНО-ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЗБЕРІГАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ТА ПОВОДЖЕННЯ З НИМ**

**АНОТАЦІЯ.** На сьогодні ситуація з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) все ще залишається складною через відсутність безпечних технологій для економічно вигідної та екологічно чистої його переробки і безпечної фінішної утилізації. Відпрацьоване ядерне паливо не є відходами у класичному визначенні та розумінні. В даній роботі ВЯП визначається як цінна вторинна енергетична сировина. У роботі отримано висновок про те, що подальший, соціально прийнятний та гарантовано безпечний розвиток світової ядерної енергетики можливий лише за умови абсолютного пріоритету ядерно-екологічної безпеки всього ядерного паливного циклу (ЯПЦ). У зв'язку з цим для вирішення складних екологічних проблем, пов'язаних з ВЯП, пропонується нова технологія покоління G5 на базі ядерних енергетичних реакторів фронтального нейтронно-ядерного горіння.

**Ключові слова:** відпрацьоване ядерне паливо, ядерно-екологічна безпека, зберігання і поводження з відпрацьованим ядерним паливом, реактор фронтального нейтронно-ядерного горіння.

**NUCLEAR-ENVIRONMENTAL SAFETY OF STORAGE AND MANAGEMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL**

**ABSTRACT.** Today, the situation with spent nuclear fuel (SNF) is still complicated due to the lack of safe technologies for its cost-effective and environmentally friendly reprocessing and safe final disposal. Spent nuclear fuel is not waste in the classical definition and understanding. In this paper, spent nuclear fuel is defined as a valuable secondary energy raw material. The paper concludes that further, socially acceptable and guaranteed safe development of the global nuclear power industry is possible only under the condition of absolute priority of nuclear and environmental safety of the entire nuclear fuel cycle (NFC). In this regard, a new technology of the G5 generation based on frontal neutron-combustion nuclear power reactors is proposed to solve complex environmental problems associated with spent nuclear fuel.

**Key words:** spent nuclear fuel, nuclear and environmental safety, storage and management of spent nuclear fuel, frontal neutron nuclear combustion reactor.

**1. Постановка проблеми.** Усі види безпеки ядерної енергетики визначаються інженерно-фізичними та науково-технічними рішеннями, що закладаються в конструкції ядерних енергетичних реакторних установок (ЯЕРУ) в процесі їх проектування, а також від методів і технологій зберігання, переробки, поводження з опроміненим відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП). Крім виробництва тепла і електроенергії кожна ЯЕРУ виробляє ВЯП та інші радіоактивні відходи (РАВ). Крім того на різних ланках енергетичного ядерного паливного циклу (ЯПЦ) також утворюються відвали породи після виробництва жовтого кеку; відвали збідненого урану утворювані в результаті збагачення ядерного палива; відходи після переробки ВЯП на радіохімічних комбінатах і навіть самі АЕС стають відходами після закінчення терміну їх експлуатації та їх ліквідації. При цьому, навіть якщо якась країна відмовляється від власної ядерної енергетики і закриває усі свої АЕС, то разом з цим залишається практично „вічна“ спадщина, що потребує складного та дорогого поводження з нею.

Сучасні ядерні енергетичні технології, як і сама ядерна енергетика, є побічними холодної війни, коли промислові ядерні реактори, в основу яких було покладено уран-плутонієвий цикл стали базовими виробничими одиницями для виробництва воєнних матеріалів. Виробництво ядерної енергії на той час не затребуваним продуктом, як і разом з утилізацією реакторних установок після їх виведення із експлуатації. При цьому екологічно чиста переробка та безпечно зберігання ВЯП та інших РАВ, а точніше, увесь комплекс екологічних питань, були другорядними і не на часі.

За оцінками МАГАТЕ, на сьогодні в 14-и країнах світу накопичено приблизно 450 тисяч тон високоактивного ВЯП. З кожного ядерного водо-водяного реактора (ВВЕР/BWR) потужністю 1 ГВт щорічно вивантажується близько 25–27 тонн ВЯП. Але на радіохімічних комбінатах перероблюється тільки третя його частина. Решта, понад 300 тис. тонн ВЯП залишається в приреакторних басейнах витримки, в тимчасових поверхневих та приповерхневих сухих або мокрих сховищах, створюючи при цьому довгострокові ядерно-екологічні ризики. До того ж в наступні два десятиліття на багатьох АЕС світу, через закінчення проектних та продовжених експлуатаційних ресурсів ЯЕРУ, додатково буде вивантажено ще 30-40 тисяч тон ВЯП.

В результаті пост чорнобильської епохи застою на сьогодні спорудження нових ЯЕРУ і перспективні плани їх будівництва до 2040-2050 років передбачають зведення енергоблоків на основі теплових ВВЕР старих модернізованих поколінь GII, GIII, GIII+ (Generation). Тому модернізовані таким чином ЯЕРУ продовжують мати низький коефіцієнт корисної дії і низьку ефективність використання подільного та дефіцитного у найближчому майбутньому ізотопу урану-235, а також генерованого ними дефіцитного на сьогодні тепла. Отже, у майбутньому виробництво і накопичення ВЯП буде продовжуватися і тому питання вирішення проблем зберігання, переробки та остаточної утилізації ВЯП стають ще більш актуальними.

Тому на сьогодні, можна говорити про те, що ядерна енергетика світу завершує першу епоху реакторних установок поколінь I, II та III, що залишає після себе надзвичайно небезпечну ядерну спадщину разом з багатьма нерозв'язаними ядерно-екологічними та технологічними проблемами з можливістю ядерних катастроф. Ця «спадщина», як показує досвід Німеччини, вимагає створення нової громіздкої інфраструктури для демонтажу ядерних блоків, для глибокого геологічного поховання високоактивного і небезпечного ВЯП, для утилізації радіоактивного старого обладнання та конструкцій, а також для вирішення довгострокових проблем поводження з ВЯП та з «енергетичним» плутонієм ті з іншими довгоживучими радіонуклідами. При цьому плутоній 239 є особливо небезпечним джерелами радіологічної небезпеки. У разі техногенної аварії, терористичної чи військової атаки його надзвичайно малі кількості здатні перетворити дуже великі території непридатними для життя та будь якої діяльності. Тому цей елемент підлягає спеціальному строгому обліку та контролю на рівні міжнародних організацій і підлягає обов'язковій надійній ізоляції від біосфери. В результаті реалізація нових масштабних ядерних енергетичних програм стає практично неможливою Все це означає, що нові ядерні енергетичні програми для своєї

реалізації змушені шукати принципово нові стратегічні технологічні рішення в порівнянні з тими рішеннями, що приймалися в епоху народження та становлення ядерної енергетики. І така стратегія повинна враховувати бажання країн, що розвиваються, а також тих замовників нових АЕС, у яких відсутня необхідна інфраструктура та висококваліфікований персонал для забезпечення всіх виробничих ланок ядерного паливного циклу та життєвих циклів ЯЕРУ і АЕС.

**2. Мета роботи.** Проаналізувати сучасний стан та перспективи технологічного забезпечення ядерно-екологічної безпеки при зберіганні та поводженні з ВЯП, а також технологічні проблеми його фінішної „довічної“ утилізації.

**3. Матеріали та методи.** У роботі використовувалися методи системного аналізу для оцінювання сучасного стану та перспектив накопичення, зберігання відпрацьованого ядерного палива та поводження з ним.

**Радіохімічні властивості та ядерно-екологічна небезпека радіохімічної переробки ВЯП.** Опромінене ВЯП, що піддається заводській радіохімічній переробці в результаті якої додатково утворюється велика кількість різних нових видів твердих і рідких РАВ [1]. В результаті радіохімічної переробки 1 тони ВЯП з метою вилучення з нього урану та плутонію, утворюється 7500 тон нових твердих і 1000-2200 тон рідких, не менш небезпечних за ВЯП, радіоактивних відходів, котрі потребують подальшого зберігання, поводження з ними та утилізації.

Щоб переробити решту 250 000 тон накопиченого ВЯП знадобиться додатково залучити в радіаційне виробництво і потім перемістити в навколишнє середовище більше як 250-550 млн тон забрудненої радіонуклідами води та вивантажити з виробництва приблизно 1 875 млрд тон твердих небезпечних РАВ.

**Технологічне переформатування та нові підходи до вирішення проблеми зберігання ВЯП та поводження з ним.** ВЯП являє собою дуже небезпечну, високорадіоактивну суміш ізотопів урану, плутонію, осколків ділення ядер трансуранових елементів і продуктів їхнього розпаду, яка зберігає свою активність упродовж десятків і сотень тисяч років і яку не можна зберігати на поверхні Землі. Однак на сьогодні у світі не існує абсолютно надійних сховищ для ВЯП і в жодній країні світу поки що немає технологій, здатних забезпечити гарантований бар'єр між радіацією і зовнішнім середовищем на такий понад тривалий період часу. Усі наявні тимчасові сховища ВЯП і РАВ у разі аварії, теракту та інших непереборних і випадкових зовнішніх впливів є такими ж небезпечними, як і сама АЕС. Тому успішне вирішення проблеми екологічно безпечної та довгої надтривалої фінішної утилізації ВЯП, як і інших РАВ, і є вирішальними для розширення безпечної ядерної енергетики.

Очевидно, що під час проектування кожного ядерного енергетичного блоку (ЯЕРБ) завжди вирішуються питання тимчасового зберігання ВЯП в приреакторних басейнах на АЕС протягом 5–10 років. Після цього його подальша доля визначається новими окремими документами та угодами між постачальником і замовником, з можливістю включення до них вимог щодо довготривалого зберігання або геологічного поховання ВЯП. Зовнішня інфраструктура за межами промислового майданчика АЕС, повинна включати тимчасове сховище ВЯП на період 50–100 років, а також сховища/могильники для РАВ з різними рівнями радіоактивності та мають бути побудовані глибинні геологічні сховища/могильники у відповідності з особливими вимогами до геологічних формацій.

Постійне вироблення і накопичення ВЯП на АЕС також є однією з головних причин антиядерних настроїв світового спів товариства і відмови багатьох країн-відмовників від ядерної енергетики.

На відміну від більшості власників ядерних енергоблоків та організацій які їх експлуатують і для яких ВЯП сприймається як відходи, принципове наукове визначення статусу ВЯП переводить його у категорію потенційно цінної ядерної промислової енергетичної «вторинної сировини». Водночас, ВЯП є ядерно- та радіаційно небезпечним

матеріалом з точки зору ризику несанкціонованого «поширення» ядерних матеріалів і обов'язково повинне підлягати абсолютній ізоляції/похованню та контролю. Тому доцільно важливо вивчити нові принципи поводження з ядерним паливом, згідно з якими будь-які постачання свіжого ядерного палива для АЕС повинні здійснюватися за умови гарантованого повернення ВЯП, після його технологічної витримки на території АЕС, назад постачальнику ЯЕРУ або ядерного палива, або ж рекомендованій постачальником спеціалізованій ліцензованій організації.

Нові високо радіоактивні відходи (ВРАВ), утворювані в результаті радіохімічної переробки відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), також повинні бути капсульовані та розміщені в геологічному сховищі/могильнику. Однією з нових пропозицій є пропозиція того, що за довгострокову долю ВЯП має відповідати постачальник ядерного палива або реакторної установки. При цьому принцип відповідальності постачальників допоможе мінімізувати ризики аварій, оскільки ці організації здатні і можуть розвивати інфраструктуру для проміжного зберігання та переробки ВЯП, з метою повернути його компоненти знову в енергетичний ядерний паливний цикл.

У загальному, для подальшої позитивної еволюції ядерної енергетики необхідно: 1) остаточною відповідальність за зберігання та поводження з ВЯП і ВРАВ слід покласти на постачальників ядерних реакторів та ядерного палива; 2) зменшити залежність від інфраструктур для тих країн, що не мають належного рівня готовності для обробки ВЯП і ВРАВ; 3) удосконалити конвенції, що стосуються переробки і поховання ВЯП, створивши міжнародні центри для його тимчасового зберігання і переробки під наглядом МАГАТЕ; 4) забезпечити надійне фінансування та контроль технологічних процесів, що будуть забезпечувати «зелене» виведення з експлуатації АЕС, дотримуючись принципу «зеленої галявини». Цей підхід може суттєво зменшити ризики, створені через накопичення ВЯП та ВРАВ і водночас забезпечуючи конкурентну спроможність ядерної енергетики на глобальному ринку, підтримуючи її екологічну безпеку.

Невирішеність питання з ядерними паливними відходами здатне впливати як на національну безпеку, так і на глобальну політичну та воєнну стабільність та довкілля, та на прояви катастрофічного ядерного воєнного тероризму при тому, що ядерні об'єкти, що попадають у зони воєнних конфліктів, є незахищеними перед воєнними та терористичними атаками. Прикладом є Запорізька АЕС в Україні.

**Стан та перспективи зберігання, поводженням та похованням ВЯП в Україні.** В планах розвитку ядерного енергетичного сектору України до 2035 року передбачено зростання ядерної електрогенерації на ядерних енергетичних реакторних установках (ЯЕРУ) на АЕС України до 94 млрд кВт/годин [2]. В цей же період практично усі українські ЯЕРУ закінчать свої проектні та продовжені понад проектні експлуатаційні терміни і повинні бути зупинені та виведені з експлуатації. Для того, щоб компенсувати зменшення вироблення електроенергії за рахунок зупинки та закриття українських ядерних енергоблоків, необхідно здійснити вибір нових реакторних енергетичних установок для будівництва в Україні нових атомних енергоблоків.

Згідно з законодавством України [3] оновлена класифікація поділяє усі РАВ на 4 класи: 1) - дуже низькоактивні, 2) - низькоактивні, 3) - середньоактивні і 4) - високоактивні (ВАВ). Відповідно до цієї класифікації також визначено 4 типи сховищ: поверхневе каньйонне; приповерхневе на глибині декількох десятків метрів; на середніх глибинах на підземних горизонтах від декількох десятків метрів і геологічне сховище з глибиною понад 100 і більше метрів.

Відпрацьоване в активних зонах українських ядерних реакторів типу ВВЕР ядерне паливо (ВЯП) не вважається радіоактивним відходом, а визнається як цінний вторинний ресурс, і тому підпадає під, так зване, "відкладене рішення" до 50-100 років протягом яких воно повинно зберігатися у поверхневих сховищах на АЕС [4]. Проте в майбутньому, воно підлягає підземному похованню в глибинних сховищах споруджуваних в стійких

кристалічних геологічних породах. У зв'язку з цим в Україні бул розроблено концепцію геологічного сховища типу KBS-3V.

Стосовно проблеми відпрацьованого ядерного палива, яке буде додатково вироблятися і накопичуватися в Україні у разі впровадження в її ядерну енергетику малих модульних реакторів (ММР) та великих модульних водо-водяних реакторів типу AP-1000, в Рекомендаціях МАГАТЕ, в списку подальших досліджень водо-водяних ММР [5] присутні зокрема також і напрямки, що стосуються зберігання та поводження з ВЯП від ММР, а саме: дослідження для поглибленого розуміння впливу характеристик палива ММР на особливості його фінішної утилізації та на проектних особливостей захисних бар'єрів сховищ і контейнерів; нові дослідження для виявлення можливих впливів на поховання радіоактивних блоків ММР; вивчення особливостей вимог щодо вибору будівельно-промислових майданчиків для розміщення ММР і проміжних і фінішних сховищ ВЯП; оцінка вимог та варіантів управління при поводженні з ВЯП; аналіз безпеки транспортних операцій з ВЯП; раннє залучення державного регулюючого органу до процесів ліцензування ММР.

Очевидно, що для виконання названих рекомендацій, доведеться вирішувати значний комплекс проблем ядерно-екологічної безпеки та багатьох різних питань, в тому числі і правових, що стосуються прийняття рішень щодо можливого впровадження ММР в українську ядерну енергетику [6].

На сьогодні ситуація з безпекою зберігання та поводженням з ВЯП та з іншими РАВ критично ускладнилась через російсько-українську війну і в першу чергу на тимчасово окупованій ЗАЕС.

Україна має 15 ядерних енергоблоків на чотирьох власних АЕС: 2 енергоблоки з ВВЕР-440 на Рівненській АЕС та 13 енергоблоків з ВВЕР-1000 на решті АЕС. Стратегія тривалого зберігання та поводження з ВЯП в Україні спрямована на його можливу переробку в майбутньому. Станом на 2024 рік в приреакторних басейнах витримки на усіх АЕС України знаходиться приблизно 1600–1800 тонн ВЯП. Після його басейнової витримки протягом 3–5 років ВЯП транспортується на ЦСВЯП, яке розраховане на зберігання більше як 16 000 відпрацьованих тепловидільних збірок (ТВЗ) в спеціальних охолоджуваних контейнерах HI-STORM виробництва компанії Holtec International.

Станом на 2023 рік, в Україні накопичено близько 3000 тонн відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), яке зберігається переважно на тимчасових сховищах при АЕС. Для довготривалого проміжного поверхневого зберігання ВЯП тривалістю до 100 років з Рівненської, Хмельницької та Південноукраїнської АЕС в Україні у зоні відчуження Чорнобильської АЕС було споруджено централізоване сховище ВЯП (ЦСВЯП), яке було введено в експлуатацію в 2021 році.

На Запорізькій АЕС є поверхневе власне сухе сховище відпрацьованого палива (СВЯП) в якому можна розмістити до 380 контейнерів із ВЯП яке експлуатується з 2001 року. Сховище призначене для зберігання ВЯП з усіх шести блоків ЗАЕС в спеціальних герметичних контейнерах з пасивним охолодженням та з проектним експлуатаційним ресурсом на 50 років.

Точна кількість поточного ядерного палива, що знаходиться в активних зонах українських реакторів, у відкритих джерелах не розголошується. Можна говорити лише про максимальну проектну кількість ядерного палива, що може сумарно знаходитися в активних зонах усіх українських реакторів: 13 енергоблоків ВВЕР-1000  $\times$  50 тонн  $\sim$  650 тонн; 2 енергоблоки ВВЕР-440  $\times$  36 тонн  $\sim$  72 тонни; всього  $\sim$  722 тонни. Отже, всього в Україні на зберіганні знаходиться приблизно понад 4500 тон ВЯП частина якого вже перевезена до сухого ЦСВЯП у Чорнобильській зоні відчуження.

В Україні немає власного радіохімічного підприємства для переробки ВЯП. Тому вивчається питання про можливість його спорудження у перспективі. Паралельно розглядається можливість відправлення українського ВЯП на закордонні переробні радіохімічні комбінати у країнах ЄС, таких як Франція або Англія. При цьому головною

метою переробки ВЯП є вилучення плутонію-239 та урану для повторного використання в ядерному паливному циклі України.

Основою ядерного палива для реакторів ВВЕР є діоксид урану ( $UO_2$ ). У свіжому ядерному паливі збагачення за ізотопом U-235 становить 2–5%. А після 3-х циклів роботи у ВЯП кількість U-235 зменшується до 0.8–1.2%. Під час паливної кампанії в активних зонах реакторів ВВЕР утворюється також нерозщеплюваний ізотоп U-236.

У відпрацьованому ядерному паливі накопичуються продукти поділу та трансуранові хімічні елементи. Загальний процентний склад ВЯП виглядає наступним чином: діоксид урану ~95–96%, продукти поділу ~3–4%, трансуранові елементи ~1% від загальної маси палива до складу яких входять:

- радіоактивні легкі газоподібні елементи криптон (Kr) і ксенон (Xe);
- лантаноїди та перехідні метали цезій (Cs), стронцій (Sr), йод (I), технецій (Tc), рутеній (Ru), паладій (Pd), молібден (Mo);
- трансуранові елементи (приблизно 1% маси палива) які утворюються шляхом захоплення нейтронів; розщеплювані ізотопи U-238: Pu-239, Pu-240, Pu-241, Am-241 (довгоживучий), кюрій (Cm) - 244 (короткоживучий з сильним теплоутворенням);
- кількість U-238 складає близько 94–96% початкової маси, тобто майже не змінюється; кількість U-235 зменшується до 0.8–1.2%;
- інші рідкісні ізотопи, як Np-237 (нептуній), є проміжними продуктами розпаду та трансуранових реакцій.

### **Особливості виробництва та накопичення ВЯП малими модульними реакторами (ММР) що плануються для впровадження в ядерну енергетику України.**

Наразі у світі компаніями розробниками та промоутерами рекламується понад 70 проектів малих модульних реакторів (ММР) [7]. За визначенням Міжнародної агенції з атомної енергії (МАГАТЕ), до ММР відносяться ядерні енергетичні реактори, що мають електричну потужність не більше як 300 Мвт(е). Вони можуть зайняти частку в диверсифікованому енергобалансі, використовуватися з метою вироблення тепла для технологічних потреб, опріснення води, виробництва водню та інше. Вони є зручними в регіонах із менш розвиненою інфраструктурою [8]. В рекламних матеріалах щодо ММР декларуються їх покращені безпекові характеристики, короткі терміни будівництва, високий ступінь гнучкості їх розміщення, спрощене їх обслуговування [9-10]. При цьому кожен проект ММР на етапах його розробки, і далі аж до виведення ММР з експлуатації, повинен мати чіткий план щодо поводження з його ВЯП [11-13], і щодо управління ядерно-паливним циклом (ЯПЦ) на основі наявної інфраструктури циклу.

Шляхом впровадження реакторів ММР в Україні Міненерго України планує перетворити вугільні ТЕС на атомні станції малої потужності (АСМП) на основі ММР. Але на сьогодні важко прогнозувати як саму реальність, так і терміни впровадження водо-водяних ММР в Україні [14] оскільки будь яка конкретна технічна та експлуатаційна інформація про ці ММР відсутня [15]. У 2018 році українська експлуатаційна компанія "Енергоатом" підписала з давнім своїм партнером - компанією Holtec International із США, меморандум про взаєморозуміння щодо співпраці у впровадженні в Україні ММР SMR-160 з частковим місцевим виробництвом реакторних модулів та іншого обладнання [16]. А у вересні 2021 році український "Енергоатом" підписав ще один меморандум з компанією NuScale Power, теж із США, про надання українському оператору АЕС допомоги у формі консультацій, експертного супроводу та техніко-економічного обґрунтування вибраних будівельно-промислових майданчиків, термінів і проміжних результатів проектів, дослідження капітальних витрат, технічного аналізу, ліцензування та дозвільної діяльності та інженерних проектних рішень [17-18]. Проте, спорудження водо-водяного реактора ММР типу NuScale (PWR) з водою під тиском в США було зупинено і проект був закритий. Причиною тому стали високі капітальні витрати на його спорудження, проблеми з фабрикацією для нього свіжого ядерного палива, збагаченого до 4,5%, недоліки його ядерно-екологічної безпеки та, зокрема, негативні висновки експертів.

Інша компанія Holtec International, теж із США, є світовим виробником і постачальником контейнерів і систем для зберігання ВЯП. Ця ж компанія проектувала для України сховища СВЯП-2 та ЦСВЯП і вона ж є розробником одно модульного ММР з водою під тиском SMR-160 потужністю 160 МВт (е) який спочатку, у 2011 році мав назву «HI-SMUR140» і який на сьогодні проходить перші етапи ліцензування [19].

Проект SMR-160 пропонує підземне розташування реактора на глибині 14 метрів разом з сухим сховищем ВЯП проектний робочий ресурс якого розрахований на 120 років, що узгоджується з декларованою компанією-виробником тривалістю проектного експлуатаційного терміну на 80-100 років.

В пасивних системах безпеки атомної станції малої потужності (АСМП) з SMR-160 вода-охолоджувач циркулює під дією сили тяжіння. В теплогенеруючих паливних збірках (твелах) SMR-160 знаходиться таблетки ядерного палива збагаченого по урану-235 до 5 %. На момент закінчення паливної кампанії великого ВВЕР активність напрацьованого в ньому ВЯП може становити  $10^{17}$ - $10^{18}$  Бк/т. А після 3-и річної його витримки в приреакторному басейні активність ВЯП зменшуватиметься на 2-3 порядки. А через п'ять років — його активність впаде приблизно до 1 % від початкової величини за рахунок розпаду коротко живучих реакторних радіонуклідів (РН) до яких належать майже 90 % усіх продуктів поділу (ПП).

Найбільші труднощі під час зберігання та поводження з ВЯП викликають тільки РН у яких періоди напіврозпаду більші за 15 років. У продуктах поділу ВЯП таких радіонуклідів налічується 11:  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{151}\text{Sm}$ , [20].

У складі ВЯП від великих ВВЕР присутня також значна група довгоживучих радіонуклідів – уранових і трансуранових елементів (актинідів) з періодами напіврозпаду більшими за 15 років. При цьому нагадаємо, що активність ВЯП визначається саме вмістом в ньому радіонуклідів з тривалими періодами напіврозпаду. На протязі перших сотень років такими є  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$ , а на протязі першої 1000-і років –  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ , та довгоживучі ПП як  $^{99}\text{Tc}$ . Далі головний внесок в радіоактивність ВЯП буде за нептунієм ( $^{237}\text{Np}$ ). З самого початку, на момент вивантаження ВЯП з активної зони ВВЕР, радіаційна активність актинідів, за виключенням плутонію ( $^{241}\text{Pu}$ ), є значно меншою в порівнянні з активністю продуктів поділу. Однак, більша частина радіонуклідів, що присутні у ВЯП, є довгоживучими джерелами  $\alpha$ -випромінювання. Їх концентрація у ВЯП визначається глибиною вигорання ядерного палива та первинного складу свіжого ядерного палива і часу витримки в басейнах, а рівень їх радіаційно-екологічної небезпеки є набагато вищим по відношенню до  $\beta$ - і  $\gamma$ -випромінювачів. При цьому, при продовженні тривалості витримки ВЯП, у ньому відбувається також і збільшення америцію ( $^{241}\text{Am}$ ). В подальшому  $^{241}\text{Am}$  і  $^{237}\text{Np}$  стають головним джерелом радіаційної активності відповідно до ланцюга ядерних реакцій  $^{241}\text{Pu}$  (14,4 роки)  $\rightarrow$   $^{241}\text{Am}$  (432 роки)  $\rightarrow$   $^{237}\text{Np}$  ( $2,14 \times 10^6$  років). Ще один ланцюг ядерних реакцій  $^{244}\text{Cm}$  (18,1 роки)  $\rightarrow$   $^{240}\text{Pu}$  (6560 років) призводить до 4-х кратного збільшення ізоотопів  $^{240}\text{Pu}$  [21].

Наочнішою характеристикою радіаційно-екологічної небезпеки може бути радіотоксичність матеріалів *Rti*. Серед трансуранових елементів найбільший індекс радіотоксичності у ізоотопів плутонію:  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  та  $^{242}\text{Pu}$ , і америцію:  $^{241}\text{Am}$  та  $^{243}\text{Am}$  радіоекологічна небезпека яких триває на протязі більше як 100 000 років [22.].

На початковому етапі радіотоксичність продуктів поділу визначають  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  і  $^{106}\text{Ru}$ , а надалі, вповодж 300 років, – переважно  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ . А ще на довгих періодах часу - понад 1000 років радіотоксичність ВЯП головним чином визначає  $^{99}\text{Tc}$  і в меншій мірі —  $^{93}\text{Zr}$  та  $^{129}\text{I}$ , і найменше — цезій 35 (Cs).

Отже, на першому етапі, який триває 300 років, при зберіганні та поводженні з ВЯП радіаційно-екологічної безпеки максимальної уваги вимагають найбільш радіотоксичні радіонукліди  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  і  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  і  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{241}\text{Am}$ . А на подальших часових інтервалах зберігання та поводження з ВЯП –  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{129}\text{I}$  і  $^{135}\text{Cs}$ . При цьому ВЯП від ММР матиме інші радіохімічні характеристики аніж ВЯП від великих



ВВЕР через те, що різниця у варіаціях рівня збагачення ядерного палива і щільніший потік теплових нейтронів впливатимуть на вигорання ядерного палива в активних зонах ММР-160 [23-26].

Більші об'єми відходів ММР різних типів, порівняно з водо-водяним реактором великої потужності, потрібно буде обробляти, зберігати і кондиціонувати перед їх похованням, що спричинять додаткові, і без того дорогі, витрати. Тому, інженери і конструктори ММР повинні забезпечити технологічні рішення з метою поліпшення ситуації з виробництвом та поводженням з ВЯП в активних зонах проєктованих ними ММР вже на ранніх етапах їх розробки, що допоможе усунути невизначеності, пов'язані з фінішною стадією ядерного паливного циклу майбутніх ММР.

Загалом можна припустити, що потоки РАВ від сумісного використання великих водо-водяних реакторів і ММР подібні, і тому можуть бути попередньо оброблені та поховані у приповерхневих і глибинних геологічних сховищах глибини. Наприклад, технологічну воду потрібно очищати від забруднювачів, що утворюють іонообмінні смоли, які належать до класу низькоактивних РАВ з коротко живучими радіонуклідами. Низькоактивні РАВ з довго живучими РН також можуть утворюватись при заміні опромінених блоків та вузлів ММР, які також мають бути похованими в сховищах споруджуваних на середніх геологічних глибинах за концепцією KBS-3V [27].

Багато концепцій ММР все ще знаходяться на ранній стадії розробки, тож для них важко визначити реальні потоки РАВ і конкретні плани поводження з ними. У той же час, на цій ранній стадії є широкі можливості висунути вимоги до базових конструкцій систем переробки РАВ і, таким чином, впливати на них. У будь-якому випадку відповідальні за поводження з РАВ мають підготуватися до поводження з ними та до їх фінішної утилізації так само, як і на АЕС з ВВЕР великої потужності. Загалом в [28] МАГАТЕ констатує, що ВЯП та інші РАВ від ММР, ймовірно, можна буде утилізувати подібно до утилізації РАВ на великих АЕС з потужними реакторами типу ВВЕР. Але, невизначеність щодо вибору технології ММР є настільки великою, що для її усунення необхідний окремий процес розробки, перевірки та ліцензування. У цьому контексті варто зазначити, що сьогодні майже в усіх країнах немає довгострокового рішення щодо РАВ від ММР, і країни, які планують впровадити ММР і створити сховища для фінішного поховання напрацьованих ними РАВ, не очікують додаткових відходів від майбутнього впровадження ММР у своїх поточних проєктах в частині зберігання ВЯП та поводження з ним. Отже, з огляду на ситуацію, що складається на ринку ядерних енергетичних технологій, є очевидним, що нові проєкти ММР, вже на стадіях концептуального проєктування та розробки, повинні передбачати управління ЯПЦ з використанням реально наявної інфраструктури. На сьогодні лише деякі розробники ММР повністю визначили або заявили про свою стратегію в цій області, зокрема, відносно поховання ВЯП на завершальній стадії ЯПЦ.

Найпереконливіше всі надзвичайно важливі проблеми стосовно будівництва ММР в Україні були сформульовані академіком НАН України, Директором Інституту проблем безпеки АЕС НАН України А.В. Носовським на спеціальному засіданні Ради нацбезпеки і оборони (РНБО) України [29]. Він висловив свою думку про те, що ММР мають будуватися в тих районах, де немає розвинутої мережі енергопостачання. В Україні вона є. А отже, ця технологія не дуже актуальна для України. В ММР запроєктовані сучасні системи безпеки. Але це лише слова. Ми не бачили ще жодної працюючої ядерної установки з ММР, що вже працює, всі вони тільки проєктуються. І може трапитись так, що ця установка буде дуже безпечною, але економічно не вигідною в порівнянні з іншими видами енергогенерації. Тому тут треба знайти баланс. Але ми ще не бачили документів і самого проєкту. Досліджувати проєкти малих реакторів потрібно заради розвитку науки. Щоправда, на побудову таких ММР в Україні можуть піти десятиліття.

Інженерні бар'єри сховища мають запобігати виносу радіоактивних речовин у навколишнє природне середовище протягом достатнього періоду часу з урахуванням періоду напіврозпаду радіонуклідів, що містяться у відходах. Важливе значення під час поводження

з ВЯП має готовність геологічних сховищ до експлуатації, тобто до глибинного не повністю контрольованого зберігання довгоживучих наявних ВЯП і у разі визнання його відходами, а також досвід провідних країн створення геологічного сховища, зокрема Фінляндії.

Фінський уряд споруджує перше у світі геологічне сховище ВЯП шахтного типу, використовуючи розроблені шведською компанією SKB методи зберігання та поховання ВЯП в мідних 2-х тонних ємностях з чавунними вставками. Ці ємності розміщуються у докембрійській товщі бентонітової глини на глибині 500 м в гранітних породах. При цьому країна залишає можливість того, що протягом наступного століття можуть з'явитися нові технології, які дозволять їм „ексгумувати“ якусь частину відходів зі сховища, якщо екологічно безпечна технологія для переробки ВЯП буде створена реально.

Однак слід пам'ятати, що під час остаточного поховання ВЯП та інших РАВ втрачається прямий контроль за захисними бар'єрами, що забезпечують екологічну безпеку. Тому важливість успішного вирішення проблем зберігання та поводження з ВЯП від ММР повинні враховуватися при виборі тієї або іншої технології ММР.

При цьому проблеми зберігання ВЯП, як і інших високо активних РАВ має два шляхи вирішення: інвестувати в спорудження власних сховищ для ВЯП або платити іншим державам за його переробку та зберігання. Результати систематизації усіх витрат на ядерно-екологічну безпеку показують, що вони спрямовуються на досягнення двох різних цілей:

- Дотримання державних стандартів ядерно-екологічної та експлуатаційної безпеки, які були розроблені та прийняті після катастрофи на АЕС Фукусіма-1, що є головною задачею оператора який зобов'язаний зробити всі необхідні інвестиції в систему і в засоби запобігання та моніторингу, а також в засоби та процедури для мінімізації або повного усунення наслідків потенційних технологічних відмов та аварійних ситуацій. Для досягнення цього на АЕС світу застосовується метод «глибокого ешелонованого захисту» що має кілька ланок послідовних систем безпеки. Їх найважливішими особливостями є здатність керувати реактивністю та охолодженням ядерного палива і локалізувати радіоактивні речовини.

- Захист проти ядерного тероризму та іншої злочинної діяльності, націленої на ядерні об'єкти при тому, що атака на ядерний об'єкт може викликати гігантські соціальні і екологічні наслідки на мільярди доларів і порушить системи енергозабезпечення і тому цей аспект на сьогодні є предметом особливої глобальної уваги з початком повномасштабної воєнної російської агресії на території України.

### **Технологія п'ятого покоління G5 (Generation 5) для вирішення проблеми ВЯП**

Постфукусімска ера ядерної енергетики відзначається посиленнями дискусіями щодо можливостей створення безпечних установок для екологічно чистого й економічно доцільного спалювання накопичених ВЯП та інших радіоактивних відходів від реакторів усіх попередніх поколінь. Хоча фізичні та інженерні ініціативи щодо пошуку рішень у цій сфері ведуться ще з самого початку розвитку ядерної енергетики, жодна з таких технологій ще не досягла свого практичного промислового застосування.

Технологія G5 є результатом багаторічних досліджень та досвіду, накопиченого протягом десятиліть, і зараз вона є логічною відповіддю на всі сучасні екологічні та технологічні виклики світової ядерної енергетики. Вперше ідея безпечної технології, яка отримала назву повільного хвильового горіння, була сформульована С. Файнбергом у 1956 році. Пізніше її теоретичні дослідження в різних країнах велися Л. Феоктистовим, С. Гольдіним, Хіроші Секімото, Ішикавою Вудом, а також творцем водневої бомби Едвардом Теллером в США за ініціативи якого ця технологія під назвою “хвильового реактора” розроблялася підприємством Terra Power, співзасновником якої є Білл Гейтс. Але цей проект не був завершений.

Історія успішних ініціативних теоретичних та модельних досліджень фронтального горіння ядерного палива в реакторній активній зоні G5 в Україні розпочалася на початку 2000-х років. Результати всіх досліджень підтверджують можливість практичної реалізації цієї технології у вигляді ядерної реакторної установки для спалювання усіх видів ядерних відходів та урану 238 з високим екологічним, енергетичним та економічним результатом.

Робота реактора з фронтальним горінням ядерного палива базується на синергетичних принципах «зеленої» технології, заснованої на тих же принципах самоорганізації, що й жива природа, на відміну від традиційної «сірої» технології, в основі якої лежить жорстке механічне креслення, пасивне дотримання команд та людський фактор оператора. У такому реакторі домінуючий внесок у поведінку активної зони роблять процеси самоорганізації нейтронно-ядерного горіння [30-31;].

Основними перевагами РФГ, у порівнянні з реакторами III і IV поколінь є їх внутрішня безпека та внутрішньо замкнений ядерний паливний цикл. У РФГ природно забезпечується локальний критичний стан активної зони. Автоматична підтримка критичного стану внаслідок особливостей нейтронно-ядерного циклу в активній зоні реактора є першим та найважливішим фактором для побудови реактора з внутрішньою безпекою, тобто. такого реактора в якому аварія гаситься не зусиллями зовнішніх систем, а автоматично через закладені в нього фізичні причини.

В історії людства революційні технології не раз змінювали світ, як це ставалося під час науково-технічних та індустріальних революцій, або за цифрової ери. Так само і проривна технологія G5 є не просто результатом еволюції усіх попередніх поколінь ядерних технологій, а є реальною проривною технологією, час якої настав, принаймі в Німеччині. При цьому її промислове впровадження в майбутньому є неминучим, і це лише питання часу.

Технологія G5 ґрунтується на принципово нових підходах до ядерної енергетики, її економіки та поводження з відпрацьованим ядерним паливом. Замість того щоб шукати безпечні місця для поховання ядерних відходів, які неможливо знайти на нашій планеті, G5 дозволяє, перш за все, комплексним чином переробляти відходи, накопичені в процесі експлуатації ядерних реакторів попередніх поколінь, блокуючи при цьому усі інші головні ризики, що пов'язані з ядерною енергетикою. Технологія також передбачає її економічну доцільність та встановлення найвищих еталонних стандартів безпеки для майбутніх поколінь енергетичних установок, на основі непорушних законів фізики, навіть у неконтрольованих ситуаціях. При цьому технологія G5 не допускає радіоактивного чи радіотоксичного забруднення як усередині реакторної зали, так і за її межами. Технологія має біологічну сумісність і соціальну прийнятність на всіх ланках свого внутрішньо реакторного закритого ЯПЦ; повну радіоекологічну безпеку в будь якій нештатній ситуації роботи.

В технології G5 устанавлюються саморегульовані процеси, що усувають небезпечний людський фактор і забезпечують стабільність роботи реакторів навіть у разі нештатних ситуацій. Технологія має внутрішньо замкнений ядерний паливний цикл, забезпечує нове комплексне рішення енергетичного використання ізоотопу  $^{238}\text{U}$ , мінімізує ризики ядерно-екологічних наслідків і власне самих ядерних катастроф на АЕС, а також технологічним чином вирішує проблему кризи нерозповсюдження, є стійкою до воєнних та терористичних атак. Технологія має: поза конкурентну економічність проектування, будівництва та експлуатації, зниження капітальних, експлуатаційних та після експлуатаційних витрат, можливість застосування серійних матеріалів та обладнання з мінімальною номенклатурою, оптимізує поводження з ВЯП та з іншими високоактивними РАВ, усуває часті перезавантаження вторинного ядерного палива, мінімізує чисельність персоналу, оптимізує витрати на НДКР.

На сьогодні нові результати фундаментальних теоретичних досліджень підтверджують можливість створення першого демонстраційного макетного зразка ЯЕРУ на базі G5 для вторинного спалювання ВЯП та інших ядерних відходів. Цей проєкт фокусується саме на вторинному, екологічно чистому та енергетично вигідному спалюванні відпрацьованого ядерного палива без використання радіохімічних технологій. Однак, для виконання наступних етапів проектування та створення інвестицій демонстраційного макетного прототипу установки потрібні серйозні інвестиції.

З огляду на зміни в європейській ядерній енергетиці після Фукусімської аварії, успішне впровадження технології G5 може започаткувати нову еру безпечної ядерної енергетики та створити новий сегмент на світовому ринку ядерних технологій.

Технологія G5 здатна ліквідувати кризу, в якій знаходиться на сьогодні світова ядерна енергетика шляхом виконання чотирьох імперативних умов: 1) недопущення несанкціонованого перевищення верхнього критичного стану активної зони ядерного реактора; 2) екологічно безпечно і енергетично вигідно зупинити виробництво та накопичення екологічно небезпечного ВЯП та інших радіоактивних відходів; 3) унеможливити розгерметизацію твелів або корпусу реактора при повній відмові систем теплообміну; технологічним шляхом подолати кризу міжнародного Договору про нерозповсюдження ядерних матеріалів та технологій.

Технологія G5 також здатна змінити ландшафт ядерної енергетики і зайняти провідне місце на світовому ядерному ринку, маючи наступні особливості:

- значне зниження обсягів виробництва ВЯП та розширення паливної бази для ядерної енергетики шляхом глибокого вигорання, до 20-50%, вторинного ядерного палива у формі ВЯП виробленого в ядерних реакторах попередніх поколінь або збідненого технічного урану, або незбагаченого природного урану 238. При цьому увесь ЯПЦ організовується безпосередньо в активній зоні реактора G5 з повним саморегулюванням процесів нейтронно-ядерного горіння усіх видів ядерних відходів які для технології G5 є вторинним ядерним паливом;

- автоматично підтримує стабільний критичний стан ЯЕРУ без втручання оператора, що виключає людський фактор і знижує ризик ядерних аварій і катастроф;

- для свого створення не потребує дорогих рідкісних та конструкційних матеріалів;

- може застосовуватися для газифікації вугілля, для зменшення споживання нафти і газу та для збільшення частки місцевих енергоресурсів і для виробництва дешевої зеленої ядерної енергії, зеленого водню, тепла для промислових і комунальних потреб на заміну викопним енергоресурсам;

- технологія здатна створити передумови для формування нового сегменту на ядерному світовому енергетичному ринку як основи для переходу до еталонно екологічної, безпечної і енергетично вигідної ядерної енергетики.

Створення та впровадження такої технології, основною метою якої є ефективна та безпечна переробка і фінішна утилізація відпрацьованого ядерного палива максимально відповідає глобальній стратегії зниження викидів “Net Zero by 2050”.

Невідворотність промислової необхідності створення та впровадження технології виникне вже в найближче десятиліття. Поштовхом для цього стане масове виведення з експлуатації більше як 200 ядерних енергетичних установок на різних АЕС світу та масове вивантаження з них небезпечної ядерної спадщини у формі відпрацьованого ядерного палива. Однак ядерна енергетика продовжить своє існування, але вже на новому технологічному рівні абсолютним пріоритетом якого буде ядерно-екологічна безпека. А це означає, що вже сьогодні в науковому середовищі, а конкретно в головах фізиків, формуються передумови становлення нової соціально прийнятної ядерної енергетики без небезпечних ядерних відходів, вибухів та ядерно-екологічних катастроф.

#### **4. Висновки:**

1. На сьогодні у всьому світі накопичено приблизно 450 тисяч тон відпрацьованого ядерного палива. З них в Україні зберігається приблизно 3000 тон. На радіохімічних комбінатах світу переробляється близько третини накопиченого ВЯП в результаті чого утворюються нові вторинні радіоактивні відходи не менш небезпечні за ВЯП. Це означає, що традиційна радіохімічна переробка ВЯП не вирішує жодних питань екологізації сучасного ядерного паливного циклу в частині переробки ВЯП.

2. У разі очікуваного масового впровадження в світову енергетику ММР ситуація з накопиченням ВЯП може погіршитися за рахунок того, що водо-водяні ММР, які є зменшеними копіями великих ВВЕР (LWR), здатні виробляти, в перерахунку на енергетичний еквівалент, більше ВЯП ніж великі реактори. Причому таке ВЯП матиме дещо інший склад, відмінний від складу ВЯП великих ВВЕР (LWR) а значить і дещо інші норми його зберігання і поводження з ним.

3. Міжнародне співробітництво в сфері створення спеціальних міжнародних центрів та сховищ, в тому числі і підземних в глибинних геологічних породах, через політичні, юридичні та технологічні труднощі виявилось малопродуктивним і тому якихось конкретних результатів цього співробітництва можна очікувати не раніше 2050-2060-х років.

4. Найперспективнішою, екологічно чистою і економічно вигідною технологією може стати революційна проривна технологія покоління G5 в основі якої покладено фізичний принцип фронтального надповільного нейтронно-ядерного горіння. Такі установки можна створювати як на теплових або швидких, так і на надтеплових нейтронах. Створення та впровадження технології G5 значно спростить увесь організаційний та технологічний процес зберігання, на всіх етапах та технологічних ланках процесу поводження та остаточної фінішної і екологічно безпечної утилізації ВЯП практично повністю усуне переважну більшість організаційних та технологічних небезпечних проблем в системі ядерного паливного циклу.

7. У контексті розробки нової архітектури безпеки світової ядерної енергетики з метою прискорення вирішення проблем накопичення ВЯП та інших РАВ доцільно і необхідно залучати міжнародні інтелектуальні, технологічні, економічні та інші ресурси для вирішення цих проблем як на національному рівні, так і на рівні світової ядерної спільноти.

## References:

1. V. Ramana (Aug. 2018) "Technical and social problems of nuclear waste," Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ., vol. 7, no. 4, p. e289, [Electronic resource] doi: 10.1002/wene.289.
2. Nosovskiy A. V. (2019) Shchodo perspektiv budivnitstva novikh atomnikh elektrichnikh stantsiy. [On the prospects for the construction of new nuclear power plants.]. Nuclear energy and the environment, No 3 (15). С.3-13
3. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо вдосконалення законодавства у сфері поводження з радіоактивними відходами» No 208-ІKh від 17 жовтня 2019 року. [The Law of Ukraine "On Amendments to Certain Laws of Ukraine on Improving Legislation in the Field of Radioactive Waste Management" No. 208-IX of October 17, 2019] [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/208-20#Text>
4. Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukraїni від 05.06.2019 No 385 Pro skhvalennya Kontseptsii Derzhavnoi ekonomichnoi programi povodzhennya z vidpratsovanim yadernim palivom vitchiznyanikh atomnikh elektrostantsiy na period do 2025 roku. Ofitsiynyi visnik Ukraїni. 2019. No 47. С. 1626. [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 05.06.2019 No. 385 On Approval of the Concept of the State Economic Program for Spent Nuclear Fuel Management of Domestic Nuclear Power Plants for the Period up to 2025. Official Gazette of Ukraine. 2019. No. 47. С. 1626]
5. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A supplement to IAEA Advances Reactors Information System (ARIS). IAEA, Vienna, 2020. [Electronic resource] URL: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)
6. Dybach A. M., Plachkov G.I. (2019) O litsenzirovanii tekhnologii malykh modulnykh reaktorov [On licensing of small modular reactor technology]. Nuclear and radiation safety. No 1(81). P. 3-9. [Electronic resource] Doi: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1\(81\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.1(81).01)
7. in Small Modular Reactor Technology Developments: A supplement to IAEA Advances Reactors Information System (ARIS). IAEA, Vienna, 2020. [Electronic resource] URL: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)
8. Nosovskiy A. V. Shchodo perspektiv budivnitstva novikh atomnikh elektrichnikh stantsiy. (2019) [On the prospects for the construction of new nuclear power plants.]. Nuclear energy and the environment. No 3 (15). P.3-13
9. NuScale Small Modular Reactor (SMR) Overview INPRO. Dialogue Forum on Opportunities and Challenges in Small Modular Reactors. Ulsan, Republic of Korea 2-5 July 2019. 33 p. [Electronic resource] URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/INPRO/df17/IV.5-KenLangdon-NuScale.pdf>.
10. IAEA-TECDOC-1785. Design Safety Considerations for Water Cooled Small Modular Reactors Incorporating Lessons Learned from the Fukushima Daiichi Accident. IAEA, Vienna, 2016. 154 p. [Electronic resource] URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1785\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1785_web.pdf).

11. Bradford, A. Fuel and Waste Considerations for Small Modular Reactors and Advanced Reactors. FCIX, 11 June 2014. [Electronic resource] URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1417/ML14170A133.pdf>;
12. Ahonen, E., Heinonen, J., Lahtinen, N., Tuomainen, M. (2020) Preconditions for the safe use of small modular reactors - outlook for the licensing system and regulatory control. Radiation and Nuclear Safety Authority. Helsinki, Finland, 28 p. [Electronic resource] URL: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-309-454-3>;
13. SKB Report. Appendix K:2 Subject-specific replies to supplementary requests. Version 3. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. Stockholm, Sweden, 2015. [Electronic resource] URL: [https://skb.se/wp-content/uploads/2015/05/Bilaga-K\\_2-2015.pdf](https://skb.se/wp-content/uploads/2015/05/Bilaga-K_2-2015.pdf).
14. Nuclear Innovation 2050: An NEA initiative to accelerate R&D and market deployment of innovative nuclear fission technologies to contribute to a sustainable energy future. OECD Publishing, Paris, 2018. [Electronic resource] URL: [https://www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/ni2050\\_%20brochure.pdf](https://www.oecd-nea.org/ndd/ni2050/ni2050_%20brochure.pdf)
15. Krall, L., Macfarlane, A. (2023) Burning waste or playing with fire? Waste management considerations for non-traditional reactors. Bull. At. Sci. 74. 2018. C. 326–334. Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving». No 2 (22).
16. Malyye reaktory na smenu krupnym AES: kak Ukraine osedlat volnu globalnykh izmeneniy v energetike. UNIAN [Small reactors to replace large NPPs: How Ukraine can ride the wave of global energy changes. UNIAN] [Electronic resource] URL: <https://www.unian.net/economics/energetics/10612260-malye-reaktoryna-smenu-krupnym-aes-kak-ukraine-osedlat-volnu-globalnykh-izmeneniy-v-energetike.html>
17. NuScale Design. PM-0616-49510-NP. NuScale Power, LLC, 2016. 232 p. [Electronic resource] URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1616/ML16161A723.pdf>,
18. Malyye modulnyye reaktory: problemy i perspektivy. AYAE. [Small Modular Reactors: Problems and Prospects. NEA.] 2021. No 7560. 55 p.
19. International Atomic Energy Agency. “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments”. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). 2020 Edition. [Electronic resource] URL: [https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_Book\\_2020.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_Book_2020.pdf)
20. Babayev N. S., Ochkin A. V., Glagolenko Yu. V. i dr. (2003) Printsipy podbora matrity dlya vklyucheniya vysokoaktivnykh otkhodov. [Principles of matrix selection for inclusion of high-level wastes ] Atomic Energy, T. 94. Issue. 5. P. 353-362
21. Babayev N. S., Merkushev A. O., Ochkin A. V., Rovnyy S. I. (2005) Raschet vremeni ustanovleniya radiatsionnoy ekvivalentnosti vysokoaktivnykh otkhodov. [Calculation of the time to establish radiation equivalence of high-level waste]. Atomic Energy. T. 8. Vol. 2. P. 123-129.
22. Babayev N. S., Merkushev A. O., Ochkin A. V., Rovnyy S. I. (2005) Raschet vremeni ustanovleniya radiatsionnoy ekvivalentnosti vysokoaktivnykh otkhodov. [Calculation of the time to establish radiation equivalence of high-level waste]. Atomic Energy. T. 8. Vol. 2. P. 123-129.
23. Brown, N., Worrall, A., Todosow, M. (2017) Impact of thermal spectrum small modular reactors on performance of once-through nuclear fuel cycles with low-enriched uranium. Annals of Nuclear Energy. No 101(2). P. 166-173 [Electronic resource] URL: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.11.003>,
24. Mancini, A., Tuite, P., Tuite, K., Woodberry S. (1994) Greater-Than-Class-C Low-Level Radioactive Waste Characterization. Appendix A-3: Basis for Greater-Than-Class-C Low-Level Radioactive Wastes Light Water Reactor Projections. Rep. DOE/LLW-114A-3. Idaho National Engineering Laboratory. Idaho, USA, 85 p.
25. Krall, L. M., Macfarlane, A. M., Ewing, R. C. (2022.) Nuclear waste from small modular reactors. PNAS. No 23. V. 119. P. 1-12. [Electronic resource] URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>.
26. Krall, L. M., Macfarlane, A. M., Ewing, R. C. (2022) Nuclear waste from small modular reactors. PNAS. No 23. V 119. P. 1-12. [Electronic resource] URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2111833119>
27. The Swedish National Council for Nuclear Waste. Nuclear Waste State of the Art Report 2022. Society, technology and ethics. Stockholm, 2022. 237 p.
28. Waste from Innovative Types of Reactors and Fuel Cycles. A Preliminary Study. IAEA Nuclear Energy Series. No. NW-T-1.7. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2019. 117 p. [Electronic resource] URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1822\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1822_web.pdf),

29. Кoментар академіка НАН України Анатолія Носовського «Чи потрібно Україні будувати малі ядерні реактори і наскільки вони безпечні» [Commentary by Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine Anatoliy Nosovsky «Does Ukraine need to build small nuclear reactors and how safe are they»]- 13.12.2022, [Electronic resource] URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-63894426>
30. Rusov V.D., Tarasov V.A., Vashchenko V.M (2013) Travelling wave nuclear reactor, - Science, Technology, Sustainable development, monogr., Kiev,130 p.
31. Vitaliy D. Rusov, Victor A. Tarasov, Volodymyr N., Vashchenko, Sergei A. Cherezhenko, Andrei A. Kakaev, Oksana I. Pantak. (2016) Fast traveling-wave reactor of the channel type. Interdisciplinary Studies of Complex Systems. No. 9. P. 36–57.

*Наукове видання*

# **ТЕХНІКА БУДІВНИЦТВА**

Збірник наукових праць

Випуск 40

Підписано до друку

Умовн. друк. арк. 14

Формат 60×84 1/8

Обл.-вид. арк. 12.5

Папір офсетний. Друк різогр.

Тираж 100. Зам. №

Адреса редакції: 02000, м. Київ, проспект Повітряних сил України, 31, кім.603б.  
Тел. +38 044 241-5548, e-mail: [tehbud@knuba.edu.ua](mailto:tehbud@knuba.edu.ua)