

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

Техніка будівництва

Збірник наукових праць



Construction Engineering

Collection of scientific works

40, 2024

Construction Engineering

Техніка буді- вництва

Collection of
scientific works

Збірник
наукових праць

Issue 40

Випуск 40

2024

2024

Published since 1997

Видається з 1997 року

Kyiv National
University of Construction
and Architecture

Київський національний
університет будівництва і
архітектури

Academy of
Construction of Ukraine

Академія будівництва
України

ISSN 2413-8959

Видається з 1997 р. двічі на рік

Засновники: Київський національний університет будівництва і архітектури,

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ №22924-12824 ПР від 7.08.2017 р.

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

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

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

Редакційна колегія:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Рекомендовано до друку Вченою радою Київського національного університету будівництва і архітектури, протокол № 23 від 28.06.2024 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>	<i>4</i>
Іван Назаренко, Євген Міщук, Дмитро Міщук, Макар Побийпеч Оцінка та аналіз навісних дробильних ківшів	4
Oleh Dedov, Volodymyr Slyusar, Andrii Bondarenko, Petro Ladkin, Oleksii Pohrebach Study of the dynamics of a vibration machine considering the influence of the processing medium.....	18
Олександр Дьяченко, Максим Балака, Ольга Капуста, Анастасія Черненко Огляд конструкцій причіпних транспортних засобів для перевезення великогабаритного і великовагового будобладнання і аналіз їх параметрів	28
Андрій Запривода Дослідження розсіяння енергії за дискретно-континуальною моделлю двомісною вібраційною системою.....	41
Геннадій Гайко, Іван Назаренко, Ілля Савченко Комбінована модель підтримки прийняття рішень щодо пріоритетів розвитку мережі автомобільних тунелів Києва.....	53
Микола Клименко, Василь Марач Особливості конструкції вертикальних валкових млинів для ефективного помелу цементу та гранульованих шлаків.....	65
Юрій Човнюк, Петро Чередніченко, Наталія Шудра, Лютіков Артем Оптимізація процесів переміщення і розгону вантажного візка мостового крана у режимі гасіння некерованих коливань вантажу.....	71
<i>Технологія захисту навколишнього середовища</i>	<i>79</i>
Олена Волошкіна, Данііл Маршалл, Юлія Березницька Дослідження процесів сорбції іонів міді природними глинистими матеріалами для захисту від забруднення підземних водоносних горизонтів	79
Назарій Негода Вплив урбанізованого середовища на стан здоров'я населення	87
Володимир Ващенко, Ірина Кордуба, Хафез Ненсі Махмуд, Негода Назарій Технологічні та екологічні особливості установок для плазмохімічного піролізу медичних відходів	93
Ілля Святогоров Тепловий режим території внутрішнього двору секційного житлового будинку в залежності від його орієнтації.....	109

Галузеве машинобудування

УДК 621.926.2

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0301>

Іван Назаренко,

доктор технічних наук,
завідувач кафедри Машин і Обладнання Технологічних Процесів,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1888-3687>
E-mail: nazarenko.ii@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. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7850-0975>
E-mail: mischuk.ieo@knuba.edu.ua

Дмитро Міщук,

доктор філософії в галузі технічних наук,
доцент кафедри Будівельних Машин,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8263-9400>
E-mail: mischuk.do@knuba.edu.ua

Макар Побийпеч,

студент спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
E-mail: pobyipech_mo@knuba.edu.ua

ОЦІНКА ТА АНАЛІЗ НАВІСНИХ ДРОБИЛЬНИХ КІВШІВ

АНОТАЦІЯ. Зниження енерговитрат стало одним із основних напрямків дослідження у сфері машин для виробництва будівельних матеріалів. Вирішення проблеми, пов'язаної з визначенням енергозатрат, є складним завданням, оскільки ці витрати залежать від багатьох факторів, які змінюються протягом роботи машини і важко піддаються точному описанню. Розвиток енергоефективних дробильних машин є одним із напрямків вдосконалення технологій виробництва будівельних матеріалів. В зв'язку з потребами переробки застарілих будівель в умовах щільної міської забудови набувають широкого розповсюдження навісні робочі органи. Одним із таких навісних робочих органів є дробильний ківш. На основі аналізу останніх досліджених встановлено перспективність навісних дробильних ківшів. В роботі розглянуто основні конструкції дробильних ківшів, які випускаються промисловістю. Виконана критеріальна оцінка по основним параметрам дробильних ківшів на основі якої встановлені перспективні моделі для подальшого дослідження. Представлена 3d модель дробильного ківш та рівняння руху для визначення основних параметрів.

Ключові слова: Дробильний ківш, енергоефективність, частота, амплітуда, гідропривід, критеріальна оцінка, рівняння руху.

EVALUATION AND ANALYSIS OF MOUNTED CRUSHING BUCKETS

ABSTRACT. Reducing energy consumption has become one of the main directions of research in the field of machines for the production of building materials. Solving the problem related to the determination of energy costs is a difficult task, since these costs depend on many factors that change during the operation of the machine and are difficult to accurately describe. The development of energy-efficient crushing machines is one of the areas of improvement of construction materials production technologies. In connection with the needs of reworking old buildings in the conditions of dense urban development, mounted working bodies are becoming widespread. One of such attached working bodies is a crushing bucket. On the basis of the analysis of the last researched, the prospects of the hinged crushing buckets were established. The work considers the main designs of crushing buckets produced by the industry. Criterion assessment of the main parameters of crushing buckets was carried out, based on which promising models for further research were established. The 3d model of the crushing bucket and the equation of motion for determining the main parameters are presented.

Keywords: Crushing bucket, energy efficiency, frequency, amplitude, hydraulic drive, criterion evaluation, equation of motion.

1. Постановка проблеми. В зв'язку з потребами переробки застарілих будівель в умовах щільної міської забудови набувають широкого розповсюдження навісні робочі органи. Одним із таких навісних робочих органів є дробильний ківш екскаватора, в деяких джерелах зустрічається назва навісна дробарка. На сьогодні широкого розповсюдження отримали навісні дробильні ківши виконані по схемі щокрової дробарки. Дробильні ківши використовуються для дроблення та переробки матеріалів на будівельних майданчиках. Вони можуть бути встановлені на різні типи будівельної техніки. Поширеними типами будівельної техніки для застосування дробильних ківшів є екскаватори та навантажувачі.

Основне напрямками де використовуються навісні дробильні ківши є: 1) переробка будівельних відходів, включаючи бетон, цеглу, асфальт, кераміку, скло тощо; 2) переробка залізничних шпал, а також інше бетонні вироби та матеріали інфраструктури, включаючи магістралі, дороги, тротуари тощо; 3) переробка природного каменю в кар'єрах, шахтах, гравійних кар'єрах і річкового гравію.

При дослідженні основних конструкцій дробильних ківшів необхідно приділити значну увагу їх технологічним можливостям, ефективності та факторам, які впливають на зниження енерговитрат, оптимізацію виробничих процесів, конструкційні особливості ківшів, а також оцінці їхньої продуктивності та енергоефективності [8].

До переваг дробильних навісних ківшів можна віднести: 1) значну продуктивність, яка впливає на рентабельність в порівнянні із стаціонарними або пересувними дробильними машинами; 2) гнучкість у використанні за рахунок можливості встановлення на різні моделі екскаваторів та навантажувачів [9].

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальні переваги дробильних ківшів відносно стаціонарних дробильних машин поверхнево розглянуто в роботі [1]. Проте основною метою досліджень в роботі [1] є визначення напружень та деформацій методом кінцевих елементів при різних частотах власних коливань. Результатом досліджень в роботі [1] наводиться графік для визначення раціональних частот коливань дробильного ківша. На основі даних з графіка пропонується встановлення демпферів для зменшення власних частот коливань та дисипації накопиченої енергії. В джерелі [2] наведе інструкція по вибору дробильних ківшів компанії Epiroc. Недоліком даної інструкції є невелика кількість технічних даних та розгляд однотипних дробильних ківшів. В джерелах [3] та [4] наведені конструктивні особливості навісних дробильних ківшів компаній Epiroc та Evo-Crusher. На основі даних по моделям ківшів та їх експлуатації, що наведені в джерелах [3] та [4] можна зробити висновок про значні відмінності в конструкціях, що свідчить про актуальність даного напрямку досліджень, відсутності класифікації ківшів та відсутності оптимальної конструкції. В джерелі [5] представлено порівняння дробильних навісних ківшів та мобільних дробильних установок на основі якого встановлено перспективність використання дробильних ківшів на невеликих кар'єрах або в стиснених умовах переробки будівельних матеріалів. Одною із поширених

проблем яка виникає під час видобутку та переробки будівельних матеріалів є оптимізація роботи обладнання та матеріалопотоків [10]. Так в джерелі [6] досліджуються методи організації роботи механічного обладнання з метою підвищення продуктивності та зниження простоїв обладнання. Тут слід зазначити, що використання дробильного навісного ківша значно підвищила б ефективність роботи такого кар'єру. В цілому слід зазначити, що для визначення енергоефективності дробильних ківшів можна використовувати аналогічні залежності, як для стаціонарних дробарок [7].

3. Мета роботи. Основною метою роботи є: 1) аналіз та оцінка конструкцій навісних дробильних ківшів, що застосовуються у будівельній та гірничодобувній промисловості; 2) на основі критеріальної оцінки по основним параметрам, визначити найбільш оптимальні конструкції для сучасних умов будівництва та переробки будівельних матеріалів; 3) створення 3d моделі дробильного ківша та визначення робочого процесу.

4. Обговорення результатів дослідження. дробильних навісних ківшів є: 1) значна продуктивність, яка впливає на рентабельність в порівнянні із стаціонарними або пересувними дробильними машинами. В цілому на сьогодні виробництвом виготовляється декілька типів дробильних ківшів. Схематично принцип роботи поширених типів ківшів відображено на рис. 1.

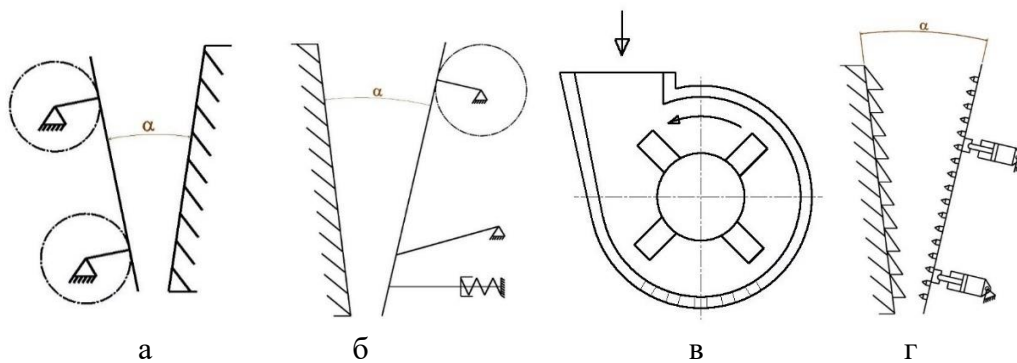


Рис. 1. Схеми основних типів дробильних ківшів:

а – ексцентрикового типу з двома валами; б – ексцентрикового типу з одним валом (аналог щокової дробарки із складним рухом щоки); в – по типу роторної дробарки; г – з приводом щоки від гідроциліндрів

Fig. 1. Schemes of the main types of crushing bucket:

а – eccentric type with two shafts; б eccentric type with one shaft (an analogue of a jaw crusher with a complex movement of the jaw); с – by the type of rotary crusher; d – with a cheek drive from hydraulic cylinders

Навісний дробильний ківш з двома ексцентриковими валами в основному виготовляють компанії Xcentric (Іспанія) та Epiroc (США), рис.2. На рис. 3 представлено типову конструкцію навісного дробильного ківша компанії Epiroc. Основні елементи будови дробильного ківша є рухома щока в зборі, яка здійснює коливальні рухи за рахунок передачі коливань від двох ексцентрикових валів два.



Рис. 2. Дробильні ківші з двома ексцентриковими валами: а – компанії Xcentric; б – компанії Epiroc
Fig. 2. Crushing buckets with two eccentric shafts: а – Xcentric companies; б – Epiroc company

Привід валів здійснюється через пасову передачу двома гідродвигунами 2. Для регулювання вихідного отвору в навісному дробильному ківші використовується важільний механізм 3, який змінює кут встановлення нерухої щоки 4 в допустимих межах.

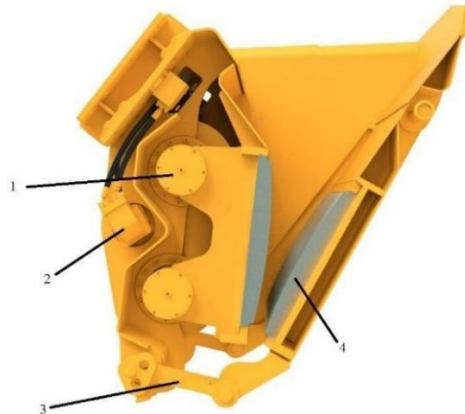


Рис. 3. Дробильний ківш компанії Epiroc:

1 – рухома щока; 2 – гідродвигун; 3 – важіль регулювання вихідного отвору; 4 – нерухома щока

Fig. 3. Epiroc crushing bucket:

1 – movable cheek; 2 – hydraulic motor; 3 – outlet adjustment lever; 4 – fixed cheek

Дробильні ківши рис. 2 є навісним робочим обладнанням екскаваторів. Виробник Xcentric наводить наступні переваги дробильних ківшів по типу з двома ексцентриковими валами: 1) стандартна періодичність обслуговування (змащення кожні 50 мотогодин); 2) менші експлуатаційні затрати за рахунок відсутності багатьох вузлів, які наявні в класичних щоккових дробарках (відтяжні пружини з важелем, розпірна плита); 3) значна інерційність рухомої щоки, за рахунок встановлення двох привідних двигунів та великої коливальної маси; 4) можливість реверсивного ходу, що дозволяє знизити можливість забивання дробилового простору; 5) наявність у верхній частині камери дроблення ківша рухомої плити, яка під час роботи ківша сприяє просуванню матеріалу до вихідного отвору; 6) взаємне розміщення рифлень дробильних плит рухомої та нерухомої щоки є хрестоподібним, що сприяє кращому захопленню волого матеріалу, знижує його налипання та пришвидшує переміщення до вихідного отвору.

Таблиця 1. Дробильні ківші компаній Xcentric та Epiroc

Table 1. Xcentric and Epiroc crushing buckets

Параметр	Xcentric XC20	Xcentric XC30	Epiroc BC 3700	Epiroc BC 5300
Вага екскаватора, т	20-25	24-35	28-38	35-54
Вага, т	2500	3500	4000	5700
Максимальний робочий тиск, МПа	25	25	25	32
Об'єм ківшу, м ³	0.8	1	1	1.2
Розмір вхідного отвору, (Height x Width, м)	0.85 x 0.54	0.91 x 0.54	0.9 x 0.42	1.1 x 0.465
CSS, мм	20-140	20-140	20-140	20-140
Подача, л/хв	175	190	199,8	300
Потужність гідродвигуна, кВт	73.95	80.3	84,4	162,3
Максимальна степінь дроблення	4	4	3	3.3

На думку автора дана конструкція дробильного ківша рис. 2 є найбільш перспективною серед інших за рахунок простоти конструкції. До недоліків конструкції можна віднести

наступні: 1) використання двох гідродвигунів, що вказує на відносно більші енергетичні затрати в порівнянні з іншими дробильними ківшами; 2) простота та надійність важільного механізму який регулює величину вихідного матеріалу, призводить до обмеженості та відсутності плавної зміни розмірів вихідного отвору.

Технічні характеристики деяких моделей навісних дробильних ківшів компаній Xcentric та Epiroc наведені в таблиці 1.



Рис. 4. Дробильні ківші з одним ексцентриковим валом:
 а – компанії Genesis; б – компанії Hartl
 Fig. 4. Crushing buckets with one eccentric shaft:
 а – Genesis companies; б – Hartl company

Найбільш поширеними на сьогодні навісними дробильними ківшами є дробильні ківші по типу щоквої дробарки із складним рухом щоки, рис. 1, б. Такі дробильні ківші виготовляють компанії MB Crusher (США), Hartl (США), Rockcrusher (США), Genesis (США). На рис. 4 представлені моделі дробильних ківшів з одним ексцентриковим валом. В цілому конструкція таких дробильних ківшів є аналогічною до конструкції щоквої дробарки із складним рухом щоки.

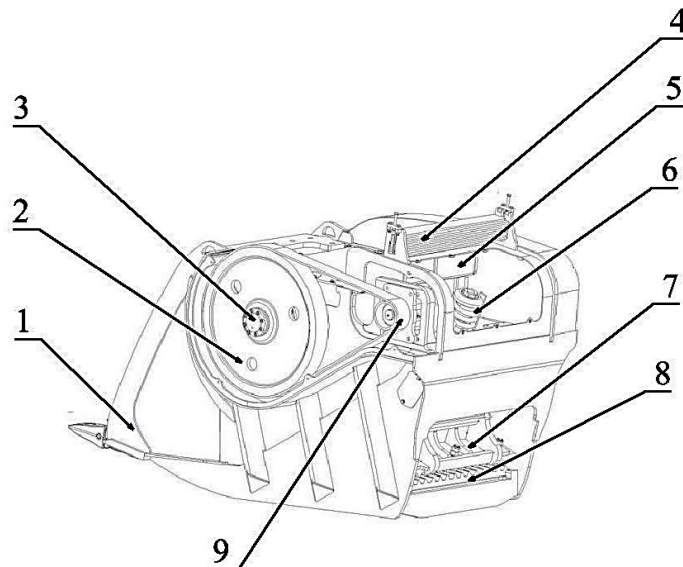


Рис. 5. Навісний дробильний ківш з одним ексцентриковим валом:
 1 – рама; 2 – шків; 3 – ексцентриковий вал в зборі; 4 – регульовальні пластини; 5 – розпірна плита;
 6 – вузол відтяжної пружини; 7 – рухома щока; 8 – нерухома щока
 Fig. 5. Hinged crushing bucket with one eccentric shaft:
 1 – frame; 2 – pulley; 3 – eccentric shaft assembly; 4 – adjusting plates; 5 – spacer plate;
 6 – tension spring assembly; 7 – movable cheek; 8 – fixed cheek

На рис. 5 представлена будова навісного дробильного ківша з одним ексцентриковим валом. Дробильний ківш складається із рами 1, до якої кріпиться нерухома щока 8. Нерухома

щока 8 та рухома щока 7 утворюють камеру дроблення. Привід рухомої щоки здійснюється за рахунок передачі крутного моменту від гідродвигуна 9 до шківів 2 через пасову передачу. Шків 2 в свою чергу передає крутий момент на ексцентриковий вал 2, на який посажена рухома щока 7. На другу консоль ексцентрикового валу насаджений маховик (не зображено на рис. 5). Для покращення процесу розвантаження матеріалу передбачена блок пружини з тягою 6. З метою запобігання руйнування елементів конструкції дробарки та фіксації щоки у відповідному положенні передбачена розпірна плита 5. Зміна розантажувального отвору здійснюється за рахунок зміни кількості регулювальних плит 4. В інших конструкціях дробильних ківшів може використовуватись клиновий або важільний механізм для регулювання вихідного отвору.

До переваг такої конструкції слід віднести підвищену надійність у роботі, що виправдовується багатолітніми дослідженнями конструкцій дробарок із складним рухом щоки. Тут також слід додати до переваг підвищену довговічність роботи окремих вузлів дробарки. Також в таких типах дробарок передбачена можливість реверсивного ходу, що спрощує процес розвантаження камери дроблення при потраплянні недробимих предметів або забиванні камери дроблення. Ще одною з переваг є знижені енергозатрати в порівнянні з дробильними ківшами в яких встановлено 2 гідродвигуни.

Таблиця 2. Дробильні ківші компаній MB та Genesis

Table 2. Crushing buckets of the MB and Genesis companies

Параметри	MB BF90.3 S4	MB BF120.4 S4	Genesis GBC 950	Genesis GBC 1250
Вага екскаватора, кг	18500	21000	34019	45359
Вага, кг	3000	3500	3955	5719
Максимальний робочий тиск, МПа	22	22	22	22
Об'єм ківша, м ³	0.7	0.9	1.3	2.17
Частота обертів, об/хв	-	-	350	350
Потужність гідродвигуна, кВт	59,5	67	74.6	108.4
Подача, л/хв	160	180	200,627	291,477
Розмір вхідного отвору, Height x Width, м	0.85 x 0.54	0.91 x 0.54	0.533 x 0.9398	0.5588 x 1.2446
CSS, мм	15-135	15-140	12 - 120	12 - 120
Максимальна степінь дроблення	4	3,8	3,77	3,95
Продуктивність, м ³ /год	34	42	-	-

До недоліків таких ківшів можна віднести складність конструкції, та як результат підвищена маса. Якщо враховувати, що даний ківш підвішується на консолі стріли екскаватора, то в процесі дроблення матеріалу можуть виникати коливання ківша, що в свою чергу може призвести до зниження енергоефективності. І дані висновки підтверджуються аналізом конструкцій дробильних ківшів різних виробників. Так, наприклад, деякі виробники пропонують, як додаткову опцію до дробильних ківшів з одним ексцентриковим валом магніт, який закріплюється в нижній частині ківша. За рахунок магнітного поля магніт додатково фіксує ківш.

Дробильні ківші по типу з одним ексцентриковим валом є поширеним навісним обладнанням для екскаваторів та навантажувачів.

Технічні характеристики деяких моделей навісних дробильних ківшів з одним ексцентриковим валом наведені в таблиці 2.

Дробильні ківші по типу роторної дробарки, рис. 1, є відносно менш поширеними ніж дробильні ківші перших двох типів і виготовляються двома компаніями – Simex (США) та Ecomesa (Фінляндія).

На рис. 6 представлені дробильні ківші компаній Simex (США) та Ecomesa (Фінляндія).



а



б

Рис. 6. Дробильні ківші компаній Simex (США) та Ecomesa (Фінляндія)
 Fig. 6. Crushing buckets of the companies Simex (USA) and Ecomesa (Finland)

Будова дробильного ківша по типу роторної дробарки представлена на рис. 7. Дробильний ківш по типу роторної дробарки складається із корпусу 1, двох гідродвигунів 2, які через муфту приводять в дію ротора 3. В цілому конструкція є дуже простою. Також є версії або з одним ротором або з двома рис 6, б по типу шредера.

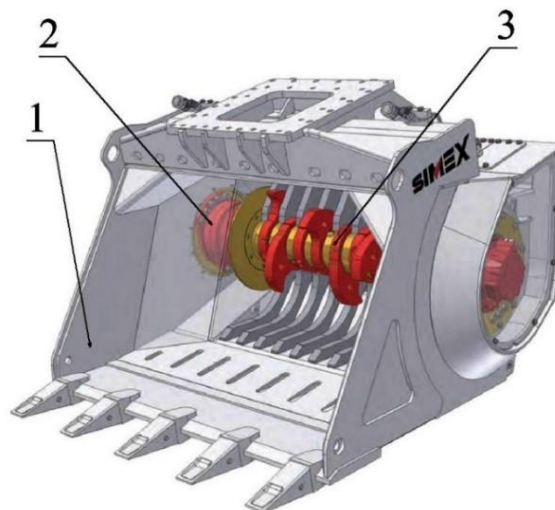


Рис. 7. Навісний дробильний ківш по типу роторної дробарки: 1 – рама; 2 – гідродвигун; 3 – ротор
 Fig. 7. Hinged crushing bucket of the rotary crusher type: 1 – frame; 2 – hydraulic engine; 3 – rotor

Перевагами дробильних ківшів по типу роторної дробарки є простота конструкції. Такі ківші найкраще себе зарекомендували при переробці будівельних відходів таких як залізобетон, цеглу, асфальт, дерево, пластик. За рахунок великої швидкості обертання ротора на кромках ножів ротора створюється значне зрізувальне зусилля, яке дозволяє таким ківшам

дробити арматуру відповідного діаметру. Також є можливість реверсивної роботи, що спрощує розвантаження дробильного ківша.

Таблиця 3. Дробильні ківші компаній Simex та Ecomesa.

Table 3. Crushing buckets of the Simex and Ecomesa companies.

Параметри	Меса 145	Меса 180	Simex CBE 30	Simex CBE 40
Вага екскаватора, т	27-40	32-45	16-28	24-40
Вага, кг	4170	4645	2170	2900
Максимальний робочий тиск, МПа	28	28	35	35
Об'єм ківшу, м ³	1,45	1,8	0.8	1
Ширина вхідного отвору, Width, мм	1100	1305	1410	1630
Діаметр ротора, мм	-	-	915	1050
Максимальна дробильна сила, кН	-	-	125	152
Продуктивність, м ³ /год	156	181	40	50
Розмір готового продукту, мм	0-150	0-150	0-120	0-130
Подача, л/хв	280	280	250	350
Потужність гідродвигуна, кВт	-	-	148	207,1
Максимальна степінь дроблення	8,4	8,4	11,75	12,5

До недоліків навісних дробильних ківшів слід віднести той факт, що ефективна робота таких ківшів можлива за умов значного тиску гідравлічної рідини. Так наприклад всі роторні навісні ківші компанії Simex (США) працюють при тискові 35 МПа. Проте ківші компанії Ecomesa (Фінляндія) працюють при дещо нижчому тискові в 28 МПа. Другий відносний недолік це значні габарити в поздовжньому напрямку. Так як для забезпечення відповідної продуктивності на рівні дробильних ківшів по типу шокової дробарки, та можливості дроблення негабаритів ширина дробильної камери таких дробарок повинна бути відповідною. Плюс додаткові габарити створюють кармани з двох боків камери дроблення, в яких розміщується привід. Ще одним недоліком може бути підвищені затрати потужності, так як зазвичай на такі ківші встановлюють 2 привідні гідродвигуни.

Дробильні ківші по типу роторної дробарки підходять до встановлення на навантажувачі та екскаватори.

Технічні характеристики деяких моделей навісних дробильних ківшів по типу роторної дробарки наведені в таблиці 3.

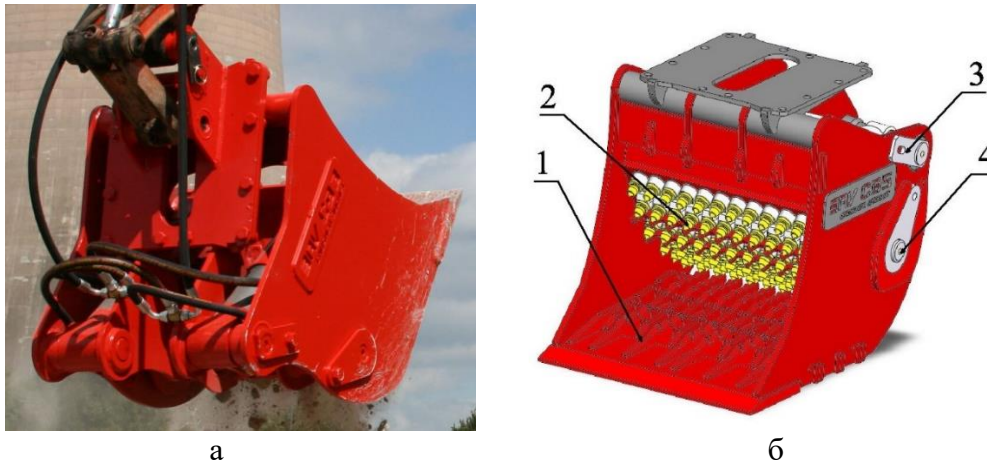


Рис. 8. Навісний дробильний ківш компанії BAV: а – дробильний ківш; б – 3d модель
 Fig. 8. Hinged crushing bucket of the BAV company: a – crushing bucket; b – 3d model

Дробильні ківші з приводом щоки від гідроциліндрів є найменш поширеними на сьогодні, рис. 1, в. Такі ківші виготовляє компанія BAV(Великобританія), рис. 8, а.

Будова дробильного ківша представлена на рис. 8, б. Ківш складається із рами до внутрішньої частини якої приварюються рифлення 1 і разом із рухомою щокою 2 утворюють камеру дроблення. Такі рифлення 1 також можуть встановлюватись в якості окремої плити. До тильної сторони рухомої щоки 2 шарнірно прикріплюються одним кінцем гідроциліндри. Іншим кінцем гідроциліндри закріплюються на вісі 3. Додатково рухома щока кріпиться на корпусі за рахунок вісі 4.

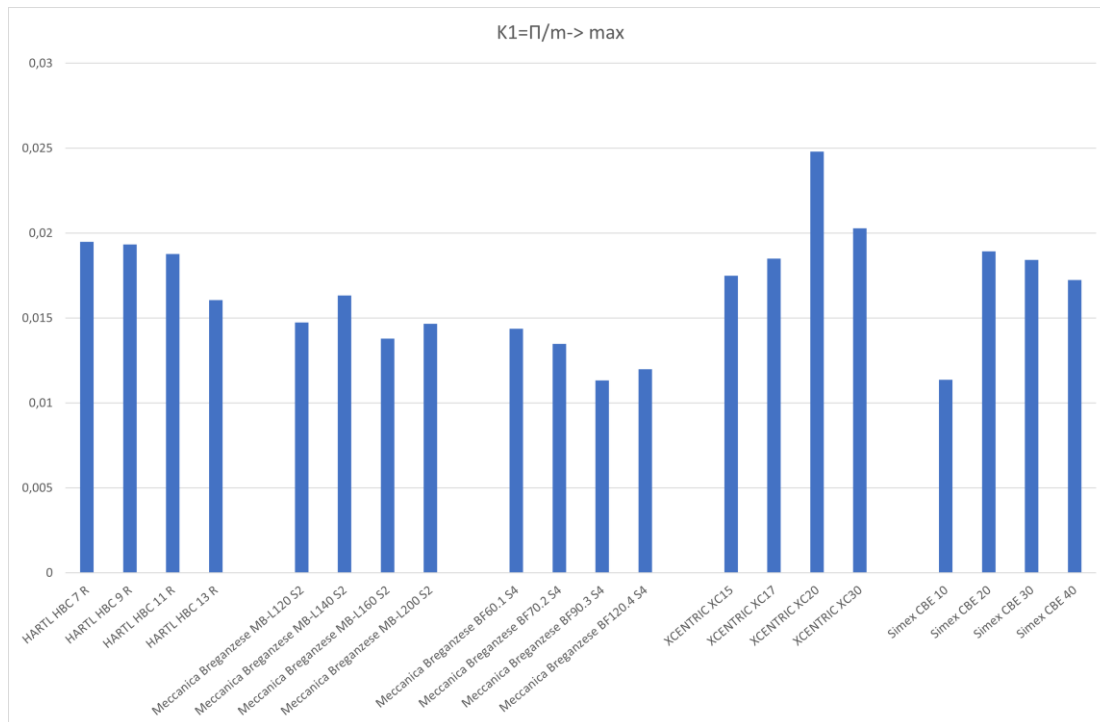


Рис. 9. Оцінка по критерію впливу маси на продуктивність
 Fig. 9. Evaluation by the criterion of mass influence on performance

Особливістю дробильного ківша крім його кінематики також є його камера дроблення. Рифленням рухомої щоки є не поздовжні або поперечні ребра, а окремо вкручені в

щокую стержні. З аналізу інформації, яку надає виробник такі дробильні ківші добре підходять для переробки бетонних плит, цегли тощо. Дробильні ківші, рис. 8, мають наступні технічні характеристики, які є доступними: 1) Вага екскаватора – до 25 тон; 2) розмір готового матеріалу – 0-100 мм; 3) в якості приводу в основному використовується 2 гідроциліндри; 4) змінні зуби рухомої щокви виконуються із карбіду вольфраму.

До переваг таких ківшів можна віднести простоту конструкції. Відсутність додаткових регулювальних механізмів, що сприяє підвищенню довговічності та простоті обслуговування. До недоліків можна віднести меншу погодинну продуктивність в порівнянні з іншими типами ківшів, трудомісткість робіт по заміні зубів рухомої щокви. Складність очищення камери дроблення при дробленні вологого матеріалу.

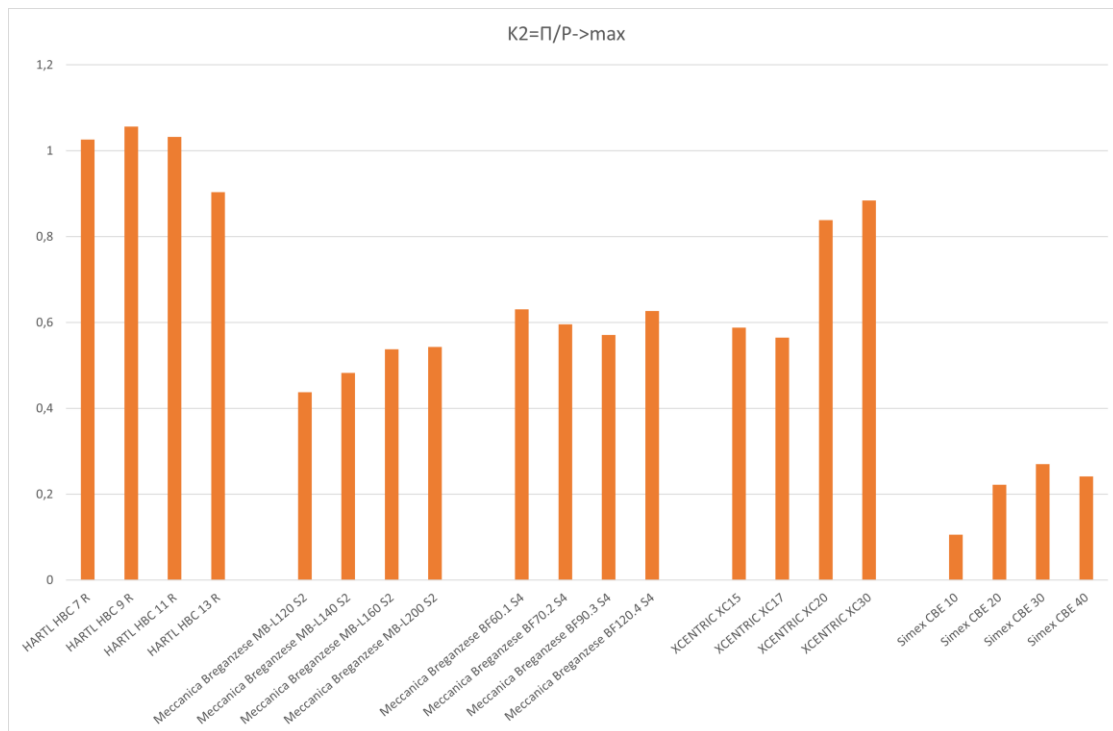


Рис. 10. Оцінка по критерію впливу витрат енергії на продуктивність
Fig. 10. Assessment by the criterion of the impact of energy consumption on productivity

У ході дослідження був проведений аналіз дробильних ківшів, які відрізняються технічними характеристиками, що визначає їхнє місце та призначення в ланцюгу виробництва та обробки будівельних матеріалів. На основі аналізу були побудовані відповідні гістограми, які представлені на рисунках 9-13.

З аналізу по критерію K_1 кращі показники мають дробильні ківші компаній Xcentric, Hartl, CB Simex. Відповідно по критерію K_2 кращі результати мають дробильні ківші компаній Xcentric, Hartl та MB.

Для оцінки техніко-економічних показників та параметрів навісних дробильних ківшів були застосовані наступні критерії: 1) K_1 - критерій оцінки впливу маси на продуктивність (->max); 2) K_2 - критерій впливу витрат енергії на продуктивність (->max); 3) K_3 - критерій впливу потужності на масу (->min); 4) K_4 - критерій впливу потужності на ступінь дроблення (->min); 5) K_5 - критерій впливу тиску на масу (->min).

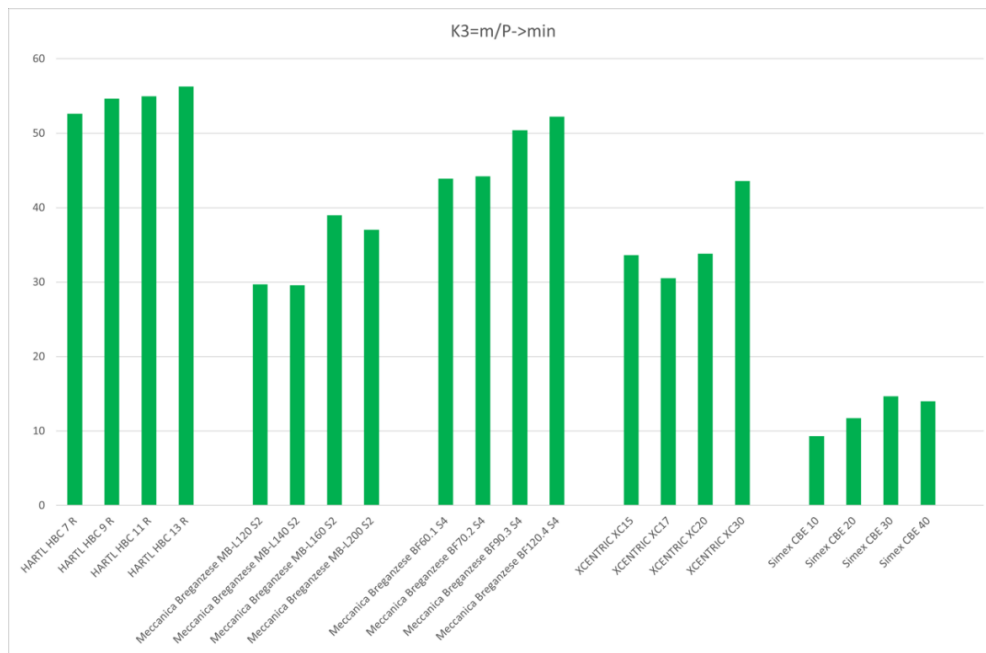


Рис. 11. Оцінка по критерію впливу потужності на масу
 Fig. 11. Evaluation according to the criterion of the effect of power on mass

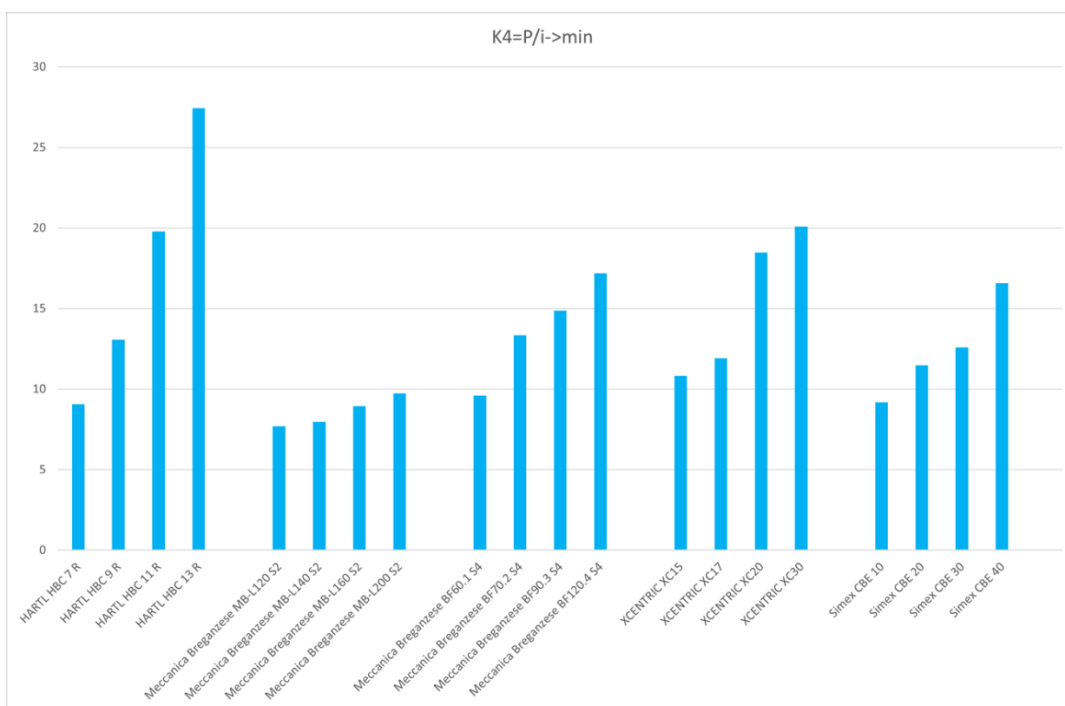


Рис. 12. Оцінка по критерію впливу потужності на ступінь дроблення
 Fig. 12. Evaluation by the criterion of the effect of power on the degree of crushing

Найкращі результати за показником K_3 є ківші компанії СВ Simex. Тут слід зазначити, що ківші СВ Simex мають відмінну кінематику від інших ківшів, які в основному працюють по схемі роздавлювання або стирання матеріалу в камері дроблення. В ківшах компанії СВ Simex руйнування відбувається за рахунок швидкісного удару і зрізу. Серед ківшів ексцентрикового типу кращі показники мають ківші компаній Xcentric та MB. Також ківші компанії СВ Simex є кращими по значенню показника K_4 .

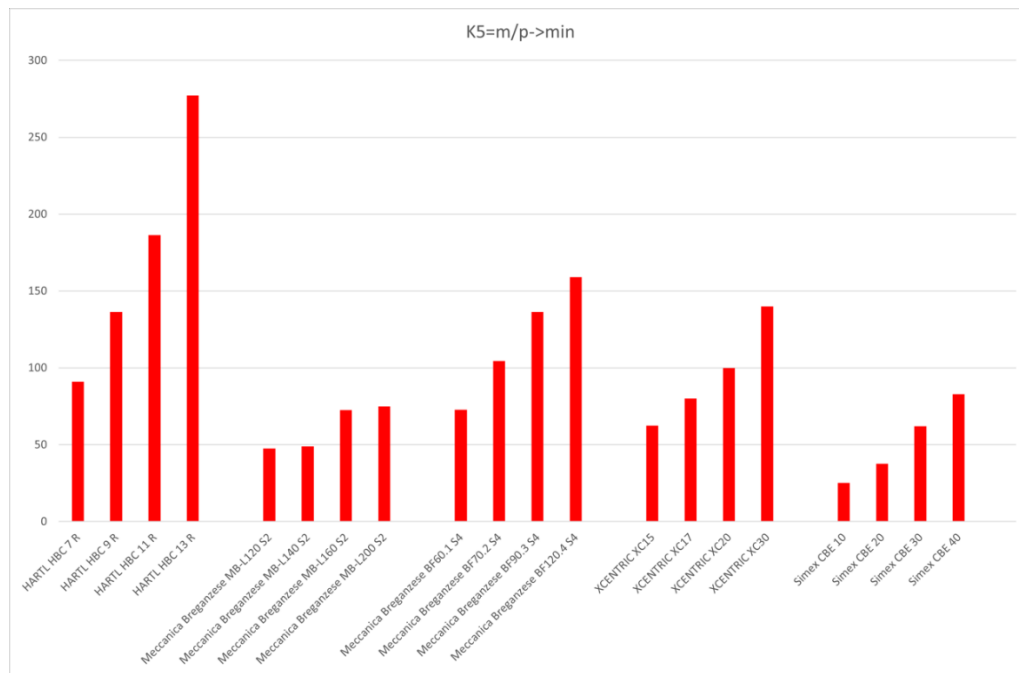


Рис. 13. Оцінка по критерію впливу потужності на степінь дроблення
 Fig. 13. Evaluation by the criterion of the effect of power on the degree of crushing

Суть оцінки по коефіцієнту K_5 полягає в можливості зменшення маси конструкції за рахунок збільшення тиску в гідравлічній системі. Важливо враховувати, що матеріал конструкції повинен забезпечувати необхідну міцність при зменшенні ваги. Дробильні ківші компаній СВ Simex та MB демонструють найкращі показники за критерієм K_5 .

Аналіз показав суттєві відмінності у вимірюваних показниках, що пояснюється різними методами розрахунку та конструювання машин. Найбільш перспективними дробильними ківшами на сьогодні є дробильні ківші з двома ексцентриковими валами та по типу роторної дробарки, що підтверджують дані критеріальної оцінки.

В рамках виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи на кафедрі Машин і обладнання технологічних процесів було розроблено та спроектовано навісний дробильний ківш по з двома ексцентриковими валами. За основу по технічним вимогам був взятий дробильний ківш компанії Epiroc BC5300. На рис. 14 представлена 3d модель дробильного ківша.



Рис. 14. 3D модель навісного дробильного ківша розробленого на кафедрі МОТП:
 а – дробильний ківш з базовим екскаватором; б – дробильний ківш
 Fig. 14. 3D model of the hinged crushing bucket developed at the Department of Mechanical Engineering and Technology: a – a crushing bucket with a basic excavator; b - crushing bucket

В якості базової машини був прийнятий кар'єрний екскаватор Liebherr 980. Для попередніх розрахунків продуктивність дробильного ківша можна визначити по наступній залежності:

$$\Pi = \frac{1800nLS(2e+S)\mu}{\operatorname{tg}\alpha}, \quad (1)$$

де n – кількість хитань дробильної щоки за визначену одиницю часу; L – довжина камери дроблення; B – ширина камери дроблення; e – ширина розвантажувального отвору; S – хід рухомої щоки; μ – коефіцієнт розпушення маси матеріалу; α – кут захвату.

Хоча в джерелі [5] продуктивність пропонується визначати по більш спрощеній залежності:

$$\Pi = 60Vn, \quad (2)$$

де V – об'єм матеріалу, м^3 ; n – кількість призм матеріалу, які випадають за 1 хв.

Оптимальна частота обертання привідного валу:

$$\omega = \frac{4}{\sqrt{S}}, \quad (3)$$

Потужність електродвигуна:

$$N = \frac{\sigma^2 L n}{3,8E} (D^2 - d^2), \quad (4)$$

де E – модуль Юнга; D – розмір вхідного матеріалу; d – розмір вихідного матеріалу.

Тривалість циклу дроблення матеріалу екскаватором можна визначити за наступною залежністю:

$$T_{\text{ек}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \quad (5)$$

де t_1 – час копання, хв; t_2 – час на колове переміщення стріли екскаватора із заповненим ківшем, хв; t_3 – час дроблення, хв; t_4 – колове переміщення стріли екскаватора із наповненим ківшем, хв.

В подальшому заплановано дослідити кінематику та динаміку дробильного ківша, рис. 14. З цією метою для навісного дробильного ківша можна скористатись наступним рівнянням руху:

$$M\ddot{\varphi} = F_{\text{ек}}, \quad (6)$$

де M – маса коливальних частин дробарки; $\ddot{\varphi}$ – кутове прискорення ексцентрикового валу; $F_{\text{ек}}$ – сила, яка прикладена до ексцентрика.

5. Висновки:

1. виконаний аналіз та оцінка конструкцій навісних дробильних ківшів, що застосовуються у будівельній та гірничодобувній промисловості;

2. На основі критеріальної оцінки по основним параметрам, визначені найбільш оптимальні конструкції для сучасних умов будівництва та переробки будівельних матеріалів. До таких дробильних ківшів відносяться ківші виконані по схемі роторної дробарки та по схемі щокової дробарки з двома ексцентриковими валами;

3. Створення 3d модель дробильного ківша та визначені основні параметри робочого процесу;

4. Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані при проектуванні та виборі дробильних навісних ківшів виходячи з умов виробництва.

Список використаних джерел:

1. G. F. Căpățână and M. A. Potîrniche (2021) Aspects regarding 3d modelling and finite element analysis of a crusher bucket. ModTech. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 1182 (2021) 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/1182/1/012012.
2. Construction & Demolition Recycling at: <https://www.cdrecycler.com/article/guide-to-bucket-crusher-hydraulic-attachments/>.
3. *Evo-Crusher. Volumetric reduction bucket for inert material*. Instruction manual. Company with quality management system certified by DNV ISO 9001:2008. Ver. 9V/07.01. p.31.
4. Epiroc BC5300. Spare parts list bucket crusher. 2021 Construction tools GmbH No. 3390786201. p.36.
5. *Danail Terziyski, Ljupcho Dimitrov, Dimitar Kaykov (2021)*. A comparison study between bucket crusher and mobile crusher performance for limestone quarries. *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"*, Vol. 64. p.92-97.
6. *Marsheal Fisonga & Victor Mutambo. (2017)* Optimization of the fleet per shovel productivity in surface mining: Case study of Chilanga Cement, Lusaka Zambia, Cogent Engineering, 4:1, 1386852, DOI: 10.1080/23311916.2017.1386852.
7. 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>.
8. Mustafa Murat Yavuz (2024) Effect of Crusher Arm Position and Surface Friction on the Mechanical Behaviour of a Crusher under Static Conditions. Hittite Journal of Science and Engineering, 2024, 11 (1) 1-6. ISSN NUMBER: 2148-4171. DOI: 10.17350/HJSE19030000325.
9. 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.
10. Marit Fladvad, Tero Onnela (2020) Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering* 151 106338. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338>.

References:

1. G. F. Căpățână and M. A. Potîrniche (2021) Aspects regarding 3d modelling and finite element analysis of a crusher bucket. ModTech. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 1182 (2021) 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/1182/1/012012.
2. Construction & Demolition Recycling at: <https://www.cdrecycler.com/article/guide-to-bucket-crusher-hydraulic-attachments/>.
3. *Evo-Crusher. Volumetric reduction bucket for inert material*. Instruction manual. Company with quality management system certified by DNV ISO 9001:2008. Ver. 9V/07.01. p.31.
4. Epiroc BC5300. Spare parts list bucket crusher. 2021 Construction tools GmbH No. 3390786201. p.36.
5. *Danail Terziyski, Ljupcho Dimitrov, Dimitar Kaykov (2021)*. A comparison study between bucket crusher and mobile crusher performance for limestone quarries. *Annual of the University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski"*, Vol. 64. p.92-97.
6. *Marsheal Fisonga & Victor Mutambo. (2017)* Optimization of the fleet per shovel productivity in surface mining: Case study of Chilanga Cement, Lusaka Zambia, Cogent Engineering, 4:1, 1386852, DOI: 10.1080/23311916.2017.1386852.
7. 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>.
8. Mustafa Murat Yavuz (2024) Effect of Crusher Arm Position and Surface Friction on the Mechanical Behaviour of a Crusher under Static Conditions. Hittite Journal of Science and Engineering, 2024, 11 (1) 1-6. ISSN NUMBER: 2148-4171. DOI: 10.17350/HJSE19030000325.
9. 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.
10. Marit Fladvad, Tero Onnela (2020) Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering* 151 106338. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338>.

UDC 69.00.25

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024.40.0302>**Oleh Dedov,**

doctor of Technical Sciences,
associate professor of the department of
machines and equipment of technological processes,
Kyiv National University of Construction and Architecture
ave. 31 Povytrynykh syl, Kyiv, 03037, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5006-772X>
E-mail: diedov.op@knuba.edu.ua

Volodymyr Slyusar,

post graduate student,
assistant of the department of
machines and equipment of technological processes,
Kyiv National University of Construction and Architecture
ave. 31 Povytrynykh syl, Kyiv, 03037, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0003-4332-3144>
E-mail: sliusar.vs@knuba.edu.ua

Andrii Bondarenko,

doctor of philosophy,
head of the department of mechanical engineering,
Odesa National Academy of Construction and Architecture,
st. Didrichsona, 4, Odesa, 65029, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4594-6399>

Petro Ladkin,

post graduate student,
Kyiv National University of Construction and Architecture
ave. 31 Povytrynykh syl, Kyiv, 03037, Ukraine
E-mail: ladkin_py-2022@knuba.edu.ua

Oleksii Pohrebach,

post graduate student,
Kyiv National University of Construction and Architecture
ave. 31 Povytrynykh syl, Kyiv, 03037, Ukraine
E-mail: pohrebach_ov-2022@knuba.edu.ua

STUDY OF THE DYNAMICS OF A VIBRATION MACHINE CONSIDERING THE INFLUENCE OF THE PROCESSING MEDIUM

ABSTRACT. *This paper presents the results of studying the dynamics of a vibration machine, taking into account its interaction with the processing medium based on representing the medium as a continuous system. The application of the complex number method significantly simplifies the formation of equations of motion for the discrete-continuous system, which is a computational model of the vibration system "machine-medium." The study substantiates and develops a method for considering the mutual influence of the machine and the processing medium, based on representing the medium as a continuous system. The dynamics of the vibration system "machine-medium" is studied, and oscillation parameters are determined without considering resistance forces. It is found that the overall motion of the vibration system is described by four components. The first three describe the natural oscillations of the system, of which the first two are determined only by initial conditions, and the third reflects the accompanying oscillations caused by the external force applied to the system. The last component defines the forced oscillations following the external force's change law. This result shows that the oscillations of the vibration system are not strictly harmonic, which is confirmed by the provided graphs. The dynamics of the "machine-medium" vibration system, considering resistance forces, are studied, and analytical dependencies for determining oscillation amplitudes and natural*

and resonant frequencies are obtained. The results of the amplitude calculations of the vibration platform for various heights of compacted concrete mixtures reveal the influence of the resistance coefficient and the ratio of oscillation frequency to the wave propagation speed in the mixture. Analysis of the obtained graphs shows that the resistance coefficient has a different effect on the amplitude of oscillations for different heights of the compacting mixture. Certain mixture height zones of the vibration system "machine-medium" operate in a near-resonant mode. A significant influence on the amplitude is exerted by the wave propagation speed, which is included in the analytical formulas for determining the numerical values of the coefficients accounting for reactive and active components of resistance.

Keywords: complex number method, vibration machine, discrete system, concrete mixture, continuous system, joint motion, resistance forces, oscillation parameters, amplitude, frequency.

1. Introduction. Modern demands in the construction industry require minimizing energy consumption while achieving high-quality execution of technological processes during the formation of concrete and reinforced concrete products. The dominant process in the production of these products is the compaction of concrete mixtures using vibration technology. Ensuring effective operating modes and parameters requires using computational models that adequately reflect the real process of vibration compaction. However, in practice, the full achievement of such conditions is constrained by discrepancies between calculated and actual parameters. This is due to the complexity of the processes occurring in the compacted mixture and the use of empirical formulas that are reliable only within the framework of the assumptions and conditions under which these studies were conducted. Moreover, resonant operating modes, which are the most common, are also energy-intensive. Therefore, finding more effective research methods and developing algorithms and calculation methods is a relevant task.

2. Literature Review and Problem Formulation. The complexity of the processes occurring in the compacted mixture under the action of vibration is the reason for various modeling methods, assumptions, and parameter evaluations of efficiency. In [1], when calculating a vibration machine for manufacturing flat concrete slabs, a discrete model was used for both the machine and the compacted mixture, providing a simplified methodology for calculating parameters. The process of compacting cement concrete mixtures in a harmonic mode is presented in [2]. Studies on the dynamics of vibration technology in processes of crushing, sorting, and compacting using both discrete and continuous models are presented in [3,4]. The use of vibration technology for concrete compaction is discussed in [5]. An analysis of the cited works demonstrates the dominance of studies focused on the steady-state operation of vibration technology. The challenge remains to explore more efficient research methods that take into account the influence of the processing material, which is the primary objective of this study.

3. Research Objectives. The goal of this research is to determine the parameters of a vibration machine considering the influence of the processing medium, represented as a continuous system. To achieve this goal, the following tasks were set:

- develop a discrete-continuous model for the motion of the combined dynamic system "vibration machine – compacting medium";
- study the dynamics of the "machine-medium" vibration system and determine the parameters without considering resistance forces;
- study the dynamics of the "machine-medium" vibration system and determine the parameters considering resistance forces.

4. Research and Determination of the Parameters of the Vibration Machine Considering the Influence of the Processing Medium Represented as a Continuous System.

4.1. Development of a Discrete-Continuous Model for the Motion of the Combined Dynamic System "Vibration Machine – Compacting Medium". To compose the motion equation of the machine, considering the influence of the processing medium, the method of complex numbers is applied [3]. The computational diagram of this system is shown in Figure 1.

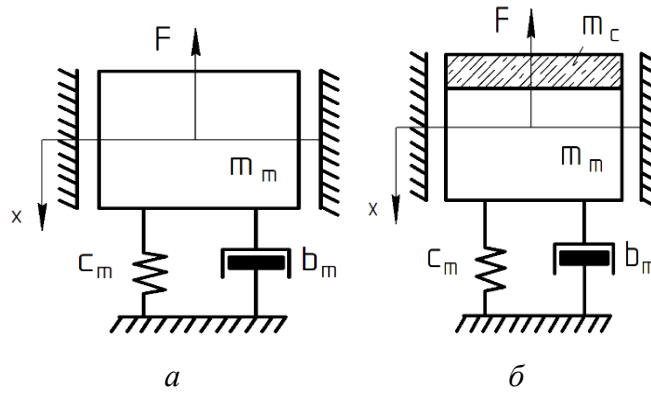


Fig. 1. Computational diagram: a - vibration machine;
b - vibration system "machine-medium".

The natural motion of such a vibration machine is described by the following equation of motion [1]:

$$m_m \ddot{x} + b_m \dot{x} + c_m x = F_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

where the first term $m_m \ddot{x}$ represents the inertia force of the moving mass, and the other terms: $b_m \dot{x}$ - represent resistance forces, $c_m x$ - stiffness, and the external force. $F = F_0 \cos \omega t$ To apply the method of complex quantities in equation (1), we replace: $F_0 \cos \omega t$ with $F_0 e^{i\omega t}$ and substituting $\bar{X} e^{i\omega t}$ instead of x , we obtain a formula that relates the complex amplitudes of forces:

$$\bar{X}(-m_m \omega^2 + i\omega b_m + c_m) = F_0 \quad (2)$$

The complex quantity in the brackets of equality (2) is the complex, dynamic rigidity of the system. Let's denote it by \bar{K}_m ; Then equality (2) can be written as follows:

$$K_m = K_m^p + iK_m^a = (c_m - m_m \omega^2) + i b_m \omega. \quad (4)$$

Here $K_m^p = (c_m - m_m \omega^2)$ - the reactive component of resistance; $K_m^a = b_m \omega$ - the active component of resistance. Therefore, the magnitude of the complex amplitude of the force \bar{X} is equal to the amplitude of the force F_0 divided by the dynamic stiffness of the system \bar{K}_m :

$$\bar{X} \cdot \bar{K}_m = F_0 \text{ або } \bar{X} = \frac{F_0}{\bar{K}_m}. \quad (3)$$

If in any oscillatory system there is mass, elasticity, and resistance (discrete system), then it is obvious that any layer of the processing medium (continuum system) has the same properties. Then the reactive K_c^p and active K_c^a components of the dynamic rigidity of the medium will be distributed throughout its volume. Thus, the dynamic rigidity of the "machine-environment" system can be represented on the basis of the use of the rule of addition of complex quantities:

$$K = K_m + K_c = (K_m^p + K_c^p) + i(K_m^a + K_c^a). \quad (5)$$

Knowing the system's dynamic stiffness allows determining the system's response $R = Kx^*$. From the condition of dynamic equilibrium, we derive the displacement law of the "machine-medium" system:

$$x^* = \frac{F_0 e^{i\omega t}}{|K|} = \frac{F_0 e^{i\omega t}}{|K_m + K_c|}. \quad (6)$$

Thus, the problem of considering the processing medium reduces to determining the active and reactive forces in the contact zone and incorporating them into the motion equation of the hybrid dynamic system. In [3], analytical dependencies were obtained for the coefficients accounting for wave phenomena in the continuous system in discrete form:

$$a = \frac{\alpha \operatorname{sh} 2\alpha h + \beta \sin 2\beta h}{h(\alpha^2 + \beta^2)[ch 2\alpha h + \cos 2\beta h]}; \quad d = \frac{\alpha \sin 2\beta h - \beta \operatorname{sh} 2\alpha h}{h(\alpha^2 + \beta^2)[ch 2\alpha h + \cos 2\beta h]}, \quad (7)$$

where a - is the coefficient accounting for the influence of reactive forces in the medium, and d is the coefficient accounting for the influence of active forces in the medium.

Thus, the equation of motion for the "machine-medium" system (Figure 1b) will have the following form:

$$(m_m + m_c a)\ddot{x} + (b_m + d/\omega)\dot{x} + c_m x = F_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

The solution of equation (8) in the form: $x = x_0 \cos(\omega t + \varphi)$ we obtain the expression for the amplitude of oscillations, x_0 , of the "machine-environment" system:

$$x_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(c_m - m_m \omega^2)^2 + (m_c \omega^2 a)^2 + (b_m \omega)^2 + (m_c \omega^2 d)^2}}, \quad (9)$$

where the denominator (9) represents the dynamic stiffness of the "machine-medium" system in its explicit form:

$$K = \sqrt{(c_m - m_m \omega^2)^2 + (m_c \omega^2 a)^2 + (b_m \omega)^2 + (m_c \omega^2 d)^2} \quad (10)$$

4.2. Study of the Dynamics of the "Machine-Medium" Vibration System and Determination of Parameters Without Considering Resistance Forces. Figure 2 presents the computational diagram of the "machine-medium" vibration system without considering resistance forces.

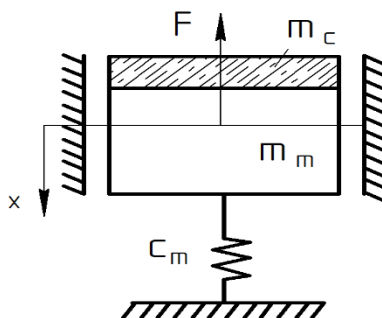


Fig. 2. Computational diagram of the "machine-medium" vibration system without considering resistance forces.

In this case, the equation of motion for such a "machine-medium" system is:

$$m\ddot{x} + c_m x = F_0 \cos \omega t, \quad (11)$$

where $m = m_m + m_c a$.

Equal (11) is converted by dividing each term by the mass:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = \frac{1}{m} F_0 \cos \omega t, \quad (12)$$

where ω_0 - is the natural frequency of the "machine-medium" system.

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c_m}{m}} \quad (13)$$

The solution to equation (12) is given by [1] and consists of two parts:

$$x(t) = A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \sin \omega_0 t + x_0 \cos \omega t. \quad (14)$$

Solution(14) takes into account free oscillations $A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \sin \omega_0 t$ and forced oscillations $x_0 \cos \omega t$; A_1 , A_2 are constant integrations, which can be defined by substituting the initial conditions into the integral:

$$[x(t=0) = x_0, \quad \dot{x}(t=0) = \dot{x}]. \quad (15)$$

Substituting the solution (14), which includes forced oscillations, into equation (12), we obtain the formula for the oscillation amplitude in the steady-state mode:

$$x_0 = F_0 / m(\omega_0^2 - \omega^2). \quad (16)$$

Taking into account equation (16), the general solution (14) becomes:

$$x(t) = A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \sin \omega_0 t + \frac{F_0 \cos \omega t}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (17)$$

The derivative of equation (17) with respect to time gives the expression for the velocity of the "machine-medium" vibration system:

$$\dot{x} = -A_1 \omega_0 \sin \omega_0 t + A_2 \omega_0 \cos \omega_0 t - 1 \frac{F_0 \omega}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \sin \omega t. \quad (18)$$

Now we can obtain the expressions of the coefficients A_1 , A_2 by substituting the initial conditions (15) in the solution (17) and (18) we have:

$$A_1 = x_0 - \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}; \quad A_2 = \frac{\dot{x}_0}{\omega_0}. \quad (19)$$

Finally, we can write the equation describing the motion of the "machine-medium" vibration system:

$$x(t) = x_0 \cos \omega_0 t + \frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega_0 t + \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos \omega t. \quad (20)$$

The resulting dependence (20) shows that, in general, the motion of a vibrational system is described by three terms. The first three terms describe the proper oscillations of the system, of which the first two are determined only by the initial conditions, and the third reflects the concomitant oscillations by the external force applied to the system. The last term of expression (20) defines forced oscillations according to the law of change of external force. Forced oscillation frequency ω and natural oscillation ω_0 frequency are different from each other, so the oscillations described by expression (20) are not strictly harmonic, which is confirmed by the above graphs (Fig. 3), where x_a and φ_0 is the amplitude and the initial phase of free oscillations

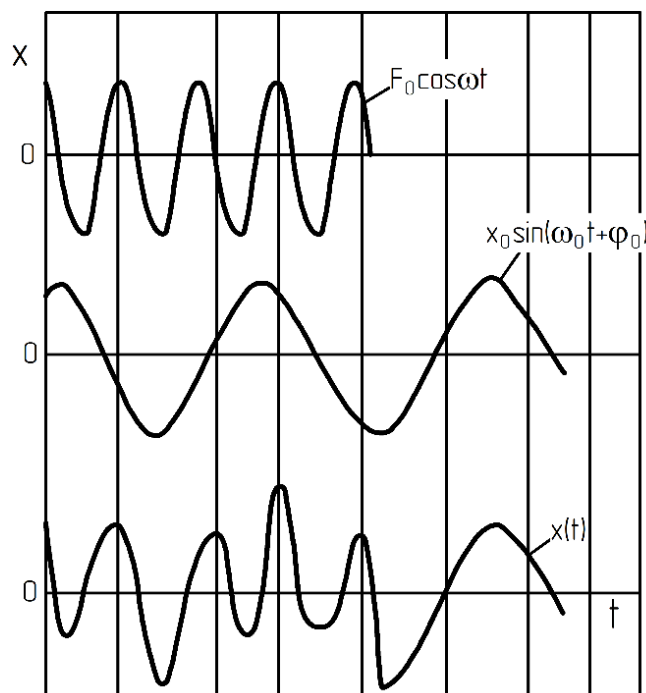


Fig. 3. Graph of the combined oscillations of the "machine-medium" vibration system without considering resistance forces.

Thus, the total oscillation of the system (1.1) consists of the sum of the unquenchable natural oscillations that last indefinitely and the forced oscillations that last during the time of the external force. Simultaneously with the forced oscillations, the accompanying oscillations also cease. The amplitude of oscillations x_0 and the phase angle φ_0 are determined by the following formulas:

$$x_0 = \sqrt{\left[x_0 - \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \right]^2 + \left(\frac{\dot{x}_0}{\omega_0} \right)^2};$$

$$\varphi_0 = \text{arctg} \frac{\left(x_0 - \frac{F_a}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \right) \omega_0}{\dot{x}_0} \tag{21}$$

The following conclusions can be drawn from the formulas obtained.

1. Provided that the frequency of forced oscillations ω is less than the frequency of natural oscillations ω_0 , $\omega < \omega_0$ the amplitude of forced oscillations x_0 is in the same phase with the external force F_0 , which, with the component of the inertial forces of the system, is balanced by the elastic forces. That is, the system is in the pre-resonance zone.

2. Provided that the frequency of forced oscillations ω and intrinsic ω_0 oscillations is equal.: $\omega = \omega_0$ Resonance occurs in the system, which makes it possible to obtain oscillations of the system with large amplitudes at minimum values of the amplitude of the external force.

3. Provided that the frequency of forced oscillations ω is greater than the frequency of natural oscillations ω_0 , $\omega > \omega_0$ the amplitude of forced oscillations x_0 is in the opposite phase with the external force F_0 , which is balanced with the elastic forces by the inertial forces of the system. That is, the system is located in the resonance zone. Forced oscillations coincide in phase with the forcing force, and when $\omega > \omega_0$ are in the opposite phase.

4.3. Study of the Dynamics of the "Machine-Medium" Vibration System and Determination of Parameters Considering Resistance Forces. The motion of the vibration system "machine – medium" taking into account the resistance forces (Fig. 1, a) is described by the above equation (1), which, after dividing by the mass of the system, will look like this:

$$\ddot{x} + 2h\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_a}{m} \cos(\omega t + \varphi), \quad (22)$$

where h is the energy dissipation coefficient: $h = b/2m$

The solution of equation (22) is as follows

$$x(t) = (A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \sin \omega_0 t) e^{-ht} + x_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (23)$$

Where the coefficients A_1, A_2 are already defined above(19); x_0 , is still the amplitude of forced oscillations; φ - the phase between the external force and the amplitude of forced oscillations of the vibration system.

By substituting solution (23) into equation (22) after simple transformations, we obtain formulas for determining the amplitude of oscillations x_a and phase

$$\left. \begin{aligned} x_a &= \frac{F_a}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}}; \\ \varphi &= \operatorname{arctg} \frac{2h\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Substituting (24) A_1, A_2, ω_0, x_0 i φ into equation (23) we obtain an expression describing the general motion of the system:

$$\begin{aligned} x(t) &= \left(x_0 \cos \omega_0 t + \frac{x_0 h + \dot{x}_0}{\omega_1} \sin \omega_0 t \right) e^{-ht} - \\ &- \frac{F_a e^{-ht}}{m \left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2 \right]} \left[(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \omega_0 t + \right. \\ &+ \left. \frac{h}{\omega_1} (\omega_0^2 + \omega^2) \sin \omega_0 t \right] + \frac{F_a \cos(\omega t - \varphi)}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}}. \end{aligned} \quad (25)$$

In equation (25), the structure of the general solution is similar to that in equation (20): the first term represents the initial free oscillations, determined only by the initial conditions; the second term represents the accompanying natural oscillations determined by the external force, and the third term represents the forced oscillations. The difference between solution (25) and solution (20) lies in the presence of terms accounting for energy dissipation in equation (25). In such a system, the natural oscillations decay quickly, and only the forced oscillations remain in the system (Figure 4).

Over time, only forced oscillations remain in the system, described by the following expression:

$$x(t) = \frac{F_a \cos(\omega t - \varphi)}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4h^2 \omega^2}} \quad (26)$$

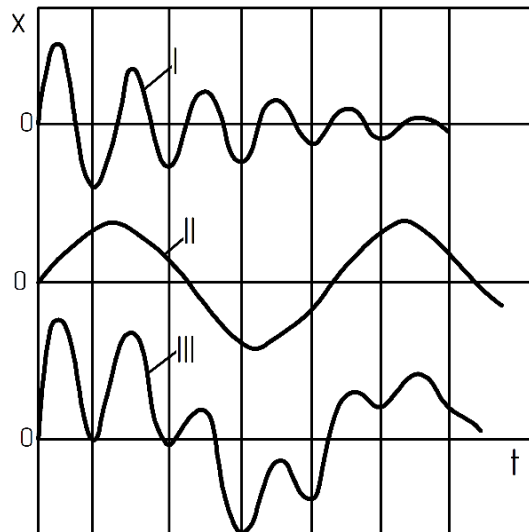


Fig. 4. Graphs of oscillations in the "machine-medium" vibration system considering resistance forces: I - decaying oscillations; II - forced oscillations; III - combined oscillations.

The resonant frequency, considering resistance forces, is determined by the formula:

$$\omega_p = \sqrt{\omega_0^2 - 2h^2}. \tag{27}$$

From this formula it follows that the resonant frequency ω_p is less than the natural frequency ω_0 : $\omega_p < \omega_0$, which is evidenced by the above graph (Fig. 5)

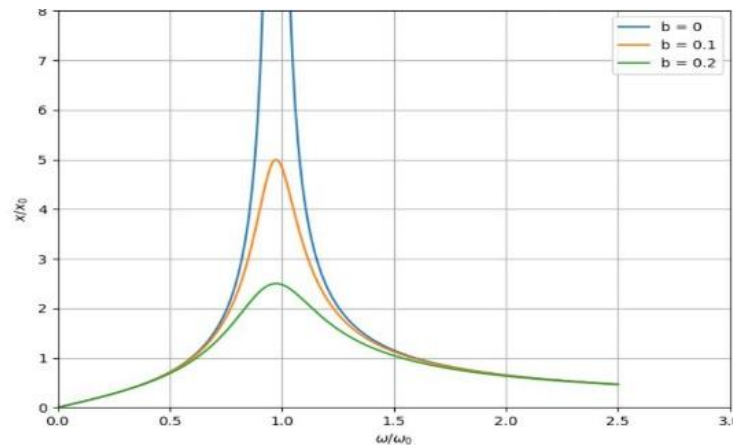


Fig. 5. Graph of changes in oscillation amplitude depending on frequency for different values of the energy dissipation coefficient.

Now, let us determine the degree of influence of coefficients (7) representing the reactive and active components of resistance in the compacting medium on the amplitude of oscillations in the vibration machine (9). Figure 6 presents the results of calculations regarding the influence of the resistance coefficient γ and the ratio of oscillation frequency to wave propagation speed c on the amplitude of oscillations in the vibration platform for different heights of the compacted concrete mixture.

From the graphs (Fig. 6, a) it follows that the coefficient γ has an insignificant effect on the magnitude of the amplitude of oscillations x at the height $h = 0.10$ m $h = 0.20$ γ . For height m , the $h = 0.3$ amplitude of oscillations decreases with increasing γ , which is explained by the significant influence of dissipative resistance forces, since in such a situation the vibration system "machine – medium" operates in an approximate resonance mode. A noticeable influence on the amplitude is

exerted by the speed of propagation of oscillations (Fig. 6.b), the value of which is included in the determination of the numerical values of the resistance coefficients of dependence (7).

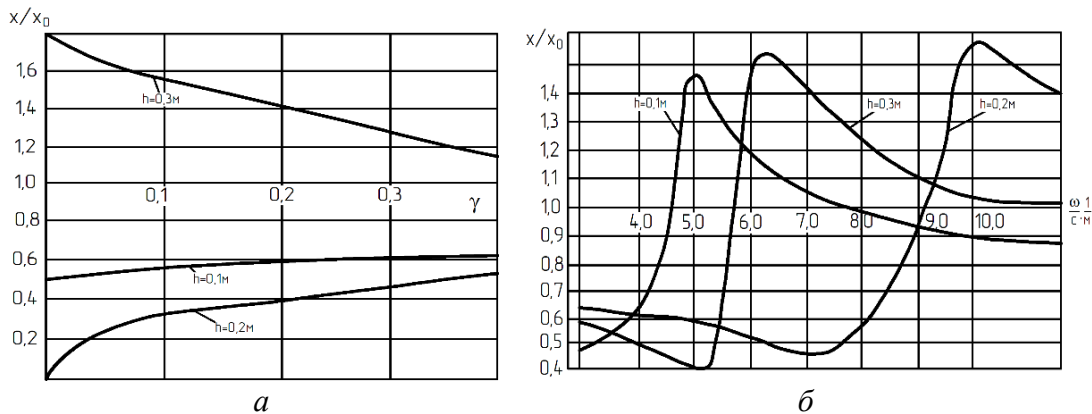


Fig.6. Results of calculations of the amplitude of vibrations of the vibration platform at different heights of the compaction concrete mixture: a-effect of the resistance coefficient γ ; The ratio of the frequency of oscillations ω to the velocity of propagation of waves C in a mixture $\frac{\omega}{c}$.

5. Discussion of the results. It was found that, in general, the motion of the vibrational system (Fig. 1) is described by equation (20) with four terms. The first three describe the natural oscillations of the system, of which the first two are determined only by the initial conditions, and the third reflects the concomitant oscillations by the external force applied to the system. The last term defines forced oscillations according to the law of change of external force. This result is new and shows that the vibrations of the vibration system are not strictly harmonic, which is confirmed by the above graphs. The dynamics of movement of the vibration system "machine – environment" is investigated, taking into account the resistance forces. Analytical dependencies for determining the amplitude of oscillations and natural and resonant frequencies of oscillations have been obtained. The degree of influence of the coefficients (7) of the reactive and active components of the resistance of the sealing medium on the amplitude of oscillations of the vibration machine (9) is determined. From the graphs (Fig. 6, a) it follows that the coefficient γ has an insignificant effect on the magnitude of the amplitude of oscillations x at the height $h = 0,10 \text{ m}$ $h = 0,20 \gamma$. For height m, the $h = 0,3$ amplitude of oscillations decreases with increasing γ , which is explained by the significant influence of dissipative resistance forces, since in such a situation the vibration system "machine – medium" operates in an approximate resonance mode. A noticeable influence on the amplitude is exerted by the speed of propagation of oscillations (Fig. 6.b), the value of which is included in the determination of the numerical values of the resistance coefficients a, d of dependence (7).

6. Conclusions.

1. It was established that ensuring effective operating modes and parameters is constrained by discrepancies between calculated and actual parameters. This is due to the complexity of the processes occurring in the compacted mixture and the use of empirical formulas that are valid only within the assumptions and conditions under which the research was conducted.

2. A research method was proposed that considers the vibration system "machine-medium" as a system governed by a single vibration process. The development of the model for this combined dynamic system is based on modern advances in the classical theory of mechanical oscillations for the subsystem "vibration machine," and the compacting medium subsystem is modeled based on the theory of dispersed media as continuous models.

3. Analytical dependencies were obtained for determining the oscillation amplitude and the natural and resonant frequencies of oscillations. The degree of influence of the reactive and active components of resistance in the compacted medium on the oscillation amplitude of the vibration machine was determined.

References:

1. Nesterenko, M. (2015). "Progressive development of vibrating installations with spatial oscillations for forming reinforced concrete products." *Collection of Scientific Papers. Series: Sectoral Engineering, Construction. Issue 2 (44)*, 16–23.
2. Maslov, O., Salenko Yu., Maslova N. "Investigation of the interaction of a vibrating plate with a cement-concrete mixture." *Bulletin of KNU named after Mykhailo Ostrohradskyi. Issue 2/2011 (67), Part 1*, pp. 93–98.
3. Nazarenko I.I., Oryshchenko S.V. "Modeling the process of material movement on a screen." *Construction Equipment. – 2009. – No. 22. – pp. 81–84.*
4. Oryshchenko S.V. "Theoretical studies and determination of the main stages of the movement of a vibrating screen." *Construction Equipment. – 2010. – No. 24. – pp. 44–47.*
5. Ruchinsky M.M., Svyrydiuk D.Ya. "Investigation of vibrations of a vibrating concrete mixer taking into account the influence of the moving material." *Construction Equipment. Scientific and Technical Journal. Kyiv: KNUCA, 2013. No. 31. pp. 35–42.*
6. Nazarenko, I. (2021). "Dynamic processes in technological technical systems." *Kharkiv, Pc Technology Center, 179. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7>.*
7. Nazarenko I.I. "Applied problems of vibration system theory." *Textbook (2nd edition). Kyiv: Publishing House "Slovo," 2010. – 440 pages.*
8. I.I. Nazarenko, E.O. Mishchuk. "Investigation of the dynamics of a double-action vibrating jaw crusher." *Mining, Construction, Road and Reclamation Machines. – 2019. – No. 94. – pp. 5–15.*
9. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Bondarenko A., Onyshchenko A., Lisnevskyi R., Slyusar V. (2023). "Determining the influence of higher harmonics of nonlinear technological load in dynamic action systems." *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 4 7 (124)*, pp. 79–88.
10. Nesterenko M.M., Nesterenko T.M., Magas N.M. "Methodology for calculating impact-vibration installations for the production of lightweight concrete products for energy-efficient building reconstruction in Ukraine." *Scientific Bulletin of Construction. – Vol. 88. – No. 2. – 2017. – pp. 178–182.*

УДК 629.3

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0303>**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

Максим Балака,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри Будівельних машин,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4142-9703>
E-mail: balaka.mm@knuba.edu.ua

Ольга Капуста,

здобувач бакалаврського рівня,
спеціальність 131 «Прикладна механіка»
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна
E-mail: kapusta_os@knuba.edu.ua

Анастасія Черненко,

здобувач магістерського рівня,
спеціальність 131 «Прикладна механіка»
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна
E-mail: khoroshun_av-2023@knuba.edu.ua

ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ПРИЧІПНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ПЕРЕВЕ- ЗЕННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО І ВЕЛИКОВАГОВОГО БУДОБЛАДНАННЯ І АНА- ЛІЗ ЇХ ПАРАМЕТРІВ

АНОТАЦІЯ. Актуальність процесів переробки будівельних відходів у вторинну сировину буде лиш зростати з роками у зв'язку з все більшою кількістю застарілих або зруйнованих будівель, які не є придатними до подальшої експлуатації. Переробка бетону у вторинний щебінь включає в себе такі процеси як розділення, сортування та подрібнення, що виконуються безпосередньо у місцях виникнення будівельних відходів. Для їх виконання необхідно доставляти спеціалізовані мобільні дробильно-сортувальні установки, які відносяться до великогабаритного і великовагового обладнання. Для транспортування мобільних дробильно-сортувальних установок, а також іншого спеціалізованого обладнання використовуються спеціальні технічні засоби для великогабаритних і великовагових вантажів. Найбільш відповідними засобами для перевезення таких вантажів є причепні транспортні засоби, а саме трали. Трали виготовляють у вигляді причепів або напівпричепів, які відрізняються як за кількістю осей, класом вантажопідйомності, висотою і способом завантаження, видом підвіски, тощо. В роботі виконано огляд існуючих конструкцій причепних транспортних засобів для перевезення великогабаритних і великовагових вантажів, проаналізовані їх параметри. За отриманими результатами визначено, що у межах одного класу вантажопідйомності трали відрізняються як за повною масою, за довжиною платформи, висотою завантаження, металоемністю конструкції та іншими параметрами. Визначені переваги і недоліки різних схем конструювання автопоїздів(тягача і причепа). Знання конструкцій цих засобів, їх параметрів і особливостей експлуатації дозволяє виконувати вибір відповідно до умов транспортування, характеристик вантажу, дальності транспортування і маршрутів.

Ключові слова: напівпричіп, мобільна дробарка, переробка, транспортування, транспортний засіб, тягач, трал

OVERVIEW OF TRAILED VEHICLE DESIGNS FOR TRANSPORTATION OF LARGE-SIZED AND HEAVY BUILDING EQUIPMENT AND ANALYSIS OF THEIR PARAMETERS

ABSTRACT: *The relevance of the processes of processing construction waste into secondary raw materials will only increase over the years due to the increasing number of outdated or destroyed buildings that are not suitable for further operation. The processing of concrete into secondary crushed stone includes such processes as separation, sorting and grinding, which are performed directly at the places of construction waste generation. For their implementation, it is necessary to deliver specialized mobile crushing and sorting plants, which belong to large-sized and heavy equipment. Special technical means for oversized and heavy loads are used to transport mobile crushing and sorting plants, as well as other specialized equipment. The most suitable means for transporting such cargoes are trailed vehicles, namely trawls. Trawlers are manufactured in the form of trailers or semi-trailers, which differ in the number of axles, load capacity class, height and method of loading, type of suspension, etc. In the work, an overview of the existing designs of trailer vehicles for the transportation of large-sized and heavy loads was performed, and their parameters were analyzed. According to the obtained results, it was determined that within the same load capacity class, trawls differ in terms of total weight, platform length, loading height, metal capacity of the structure and other parameters. The advantages and disadvantages of various layout schemes of road trains (tractor and trailer) are determined. Knowledge of the constructions of these vehicles, their parameters and operational features allows you to make a choice in accordance with the conditions of transportation, characteristics of the cargo, the distance of transportation and routes.*

Keywords: semi-trailer, mobile crusher, processing, transportation, vehicle, truck unit, trawl

1. Постановка проблеми. Не дивлячись на складні умови в Україні, функціонування будівельної галузі не зупиняється і навіть показує зростання і стійку потребу у ресурсах для виготовлення будівельних матеріалів і конструкцій. Наразі існує висока потреба у знесенні морально застарілих, а також зруйнованих або пошкоджених будівель і споруд. При знесенні будівель і споруд з'являється велика кількість бетонних відходів, які вимагають утилізації. Найбільш екологічним шляхом для цього є подрібнення бетону на вторинний щебінь і використання його при улаштуванні доріг, шляхів, а також при виготовленні будівельних матеріалів з продуктів переробки.

Для подрібнення бетону і сортувати вторинний щебінь на фракції використовують перелік мобільних дробильно-сортувальних установок, які доставляються безпосередньо у місця виникнення будівельних відходів. Це дозволяє скоротити логістичних ланцюг перевезення будівельних відходів і зменшити забруднення довколишнього середовища.

Подібне обладнання зазвичай відноситься до великогабаритного і великовагового вантажу, яке ускладнено переміщувати по дорогам загального користування як державного так і місцевого значення, поруч із цим є потреба транспортування подібних вантажів у місця, які постраждали від бойових дій або є важкодоступними через поганий стан автодоріг.

Для того, аби раціонально обирати транспортні засоби відповідно до характеристик вантажу, що підлягає перевезенню, потрібні знання видів транспортних засобів, які входять у автопоїзд, їх конструкцій і параметрів, розумінні на питаннях транспортування вантажів у межах України і методів розрахунку їх параметрів.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій:

Загальноновизнано, що будівельні відходи мають значний потенціал як вторинна сировина. Використання передових технологій переробки, які користуються все більшим попитом завдяки своїм екологічно чистим підходам, може перетворити ці відходи на вторинні продукти. Це не лише скорочує витрати на будівельні проекти, але й зменшує навантаження на полігони, стримуючи розповсюдження несанкціонованих звалищ [8].

Важливим моментом в ефективному управлінні будівельними відходами як потенційним вторинним ресурсом є їх різноманітна природа, що зумовлена різними джерелами утворення. Будівельні відходи поділяються на дві основні групи: перша група охоплює відходи,

що утворюються під час таких видів діяльності, як реконструкція, ремонт, нове будівництво та виробництво будівельних матеріалів, деталей і конструкцій. До другої групи належать відходи, що утворюються в результаті знесення будівель і споруд [1]. Детальна класифікація будівельних відходів наведена у публікації [2].

Процес поділу будівельних відходів за класифікацією сприяв чіткому регулюванню окремих секторів будівельної галузі, зокрема, переробки будівельних матеріалів та виробів. Такі країни, як Данія, Нідерланди та Бельгія, стали прикладом цього завдяки вдосконаленню законодавства та технологічним інноваціям [2].

На кожному етапі технічного процесу переробки бетону/залізобетону використовуються спеціалізоване обладнання [3]. Першим етапом у процесі переробки бетону є процес розділення, який виконується для відділення залізобетонних виробів від інших матеріалів (таких як метал, металопластик, теплоізоляційні матеріали) [4]. Розділення здійснюється з використанням спеціалізованих комплектів машин, обладнаних маніпуляторами, відбійними молотками, і щелепними затискачами. Другий етап – збір та транспортування. На даному етапі відбувається збір бетонних відходів з будівельних майданчиків і місць демонтажу, після чого бетонні відходи транспортуються у місця переробки. Третій етап – дроблення. Після того, як бетонні відходи зібрано, їх подрібнюють на менші частини за допомогою дробарки, що розбиває бетон на більш дрібні частини, які можна повторно використовувати в нових будівельних проектах [5]. Фінальне сортування і очищення. Після первинного дроблення матеріал сортується за розміром. Для даного етапу переробки використовується таке обладнання як грохот (барабанний, вібраційний, резонансний, інерційний). Останнім кроком є повторне використання переробленого бетону в нових будівельних проектах. Приблизно 60% бетону можна використовувати повторно. Перероблений матеріал можна використовувати як основу для доріг та інших будівельних проектів.

Побідне обладнання зазвичай є великогабаритним та великоваговим, тому його перевезення це складний процес, який вимагає ретельного планування і виконання. Тип вантажу визначається виходячи з параметрів вантажу, таких як маса, габаритні розміри, розміщення центру мас, наявності кріплень для вантаження/розвантаження та фіксації на транспортному засобі, тощо. Все це вимагає вибору транспортних засобів: від великих вантажівок до спеціалізованих транспортних засобів для перевезення вантажів [6].

Перевезення вантажів, які відрізняються від стандартних розмірів, ваги та об'єму, створює певні проблеми, оскільки стандартні методи транспортування часто є недостатніми. Для перевезення таких вантажів можуть знадобитися спеціалізовані транспортні засоби, унікальні методи та нестандартні маршрути [7].

3. Мета роботи. Метою роботи є визначення раціональної конструкції причіпного транспортного засобу, що використовується для перевезення великогабаритного і великовагового будівельного обладнання. Досягнення мети здійснюється шляхом огляду конструкцій причіпних транспортних засобів, аналізу схем компоновання автопоїздів, визначенню їх недоліків і переваг, а також дослідженню і порівнянню параметрів причіпних транспортних засобів, що представлені на ринку.

4. Матеріали та методи. Обґрунтування і вибір типу транспортного засобу (ТЗ) для перевезення обладнання виконано у результаті вибору конкретного обладнання та його характеристик. Вибір типу ТЗ проводитиметься за умови перевезення мобільної дробильно-сортувальної установки (ДСУ) (рис.1) [9].

Мобільні дробильні установки користуються широкою популярністю завдяки своїй багатофункціональності і мають ряд вагомих переваг і поступово витісняють стаціонарні системи дроблення, оскільки дозволяють скоротити витрати на транспортування сировини, знижують експлуатаційні витрати та забезпечують легке переміщення обладнання між виробничими майданчиками.

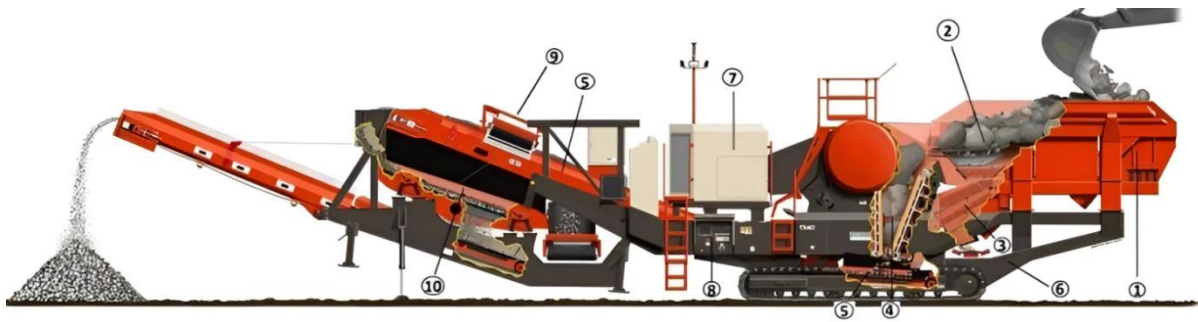


Рис.1. Узагальнена схема мобільних ДСУ:

1 – завантажувальний бункер; 2 – живильник; 3 – двохдечний грохот попереднього просівання; 4 – дробильна камера; 5 – захисна плита стрічки і головний конвеєр; 6 – шасі; 7 – силовий агрегат; 8 – система управління; 9 – магнітний сепаратор; 10 – підвісний грохот.

Fig.1. Generalized scheme of mobile CSP:

1 – loading hopper; 2 – feeder; 3 – a two-sided pre-sieving sieve; 4 – crushing chamber; 5 – belt protective plate and main conveyor; 6 – chassis; 7 – power unit; 8 – control system; 9 – magnetic separator; 10 – hanging screen.

Для обґрунтування та вибору ТЗ для перевезення мобільної дробильно-сортувальної установки визначено технічні умови на перевезення. Технічні умови складено, базуючись на прикладах обладнання виробників світового рівня (McCloskey International, Sandvik AB, Terex).

Для прикладу подано транспортні параметри мобільних дробильних установок трьох фірм, які відомі як в Україні, так і закордоном(таблиця 1).

Таблиця 1. Транспортні параметри мобільних дробильно-сортувальних установок
Table 1. Transporting parameters of mobile crushing-sorting stations

Параметр	Одиниця виміру	J40 (McCloskey International)	UJ440i (Sandvik)	J-1160 (Terex)
Транспортна висота, ширина, довжина	м	3,2/2,5/13,78	3,9/3,0/16,6	3,5/2,6/15,7
Максимальний розмір продукту подрібнення,	мм	518,5	705,5	510
Продуктивність,	т/год	250	700	300
Потужність двигуна,	кВт	166	315	270
Вага	т	36,94	63	35,35

З порівняльної таблиці виконано орієнтовний вибір мобільної дробарки на основі наступних параметрів:

- найменша маса установки;
- найменша потужність силової установки;
- розмір продукту, який підлягає подрібненню на установці – 500 мм;
- продуктивність подрібнення матеріалу – 200 м³/год;
- установка повинна мати найменші габаритні розміри у транспортному положенні.

За цими параметрами найбільш вдалою моделлю до використання на майданчику обрано установку J40 (McCloskey International). Вона має одну з найменших мас (36,94 тон), найменші габаритні розміри(3,2x2,5x13,78 м), що дозволяє за габаритами установки транспортувати її з використанням стандартних засобів у межах населених пунктів без отримання спецдозволів(обмеження по висоті і ширині вантажу – 4,5x2,6 м). Крім того, J40 використовує економічний двигун Caterpillar С6.6, що дозволяє досягти оптимізації енергоспоживання.

На рис.2 наведено креслення транспортної(а) та робочої(б) конфігурації дробарки J40.

Установка має гусеничний рушій, що забезпечує маневреність на різних типах рельєфу на будівельному майданчику. Гідравлічні аутригери значно зменшують вимогливість до стану поверхні, на якій відбувається установка та експлуатація машини.

Транспортна конфігурація J40 відрізняється від робочої конфігурації наступним:

1. Бункер, камера у верхній частині, яка приймає матеріал для дроблення, розташовується в опущеному положенні, за рахунок чого зменшується загальна висота дробарки, роблячи її більш придатною для проїзду під низькими мостами, тунелями або транспортними контейнерами.

2. Дробарка спирається на гідравлічні аутригери. Аутригери мають гідравлічний привід і розташовуються в стратегічних точках на рамі дробарки. У робочому положенні аутригери опущені, а при переміщенні власним ходом – підняті. При транспортуванні машини на платформі їх опускають, однак не підіймаючи гусеничне шасі з платформи. Так краще розподіляється навантаження.

3. Опори бункера (необхідні для забезпечення стабільності під час дроблення при підняттю бункері) в транспортній конфігурації опускаються, завдяки чому відбувається мінімізація загальної ширини дробарки для полегшення маневрування та дотримання правил транспортування.

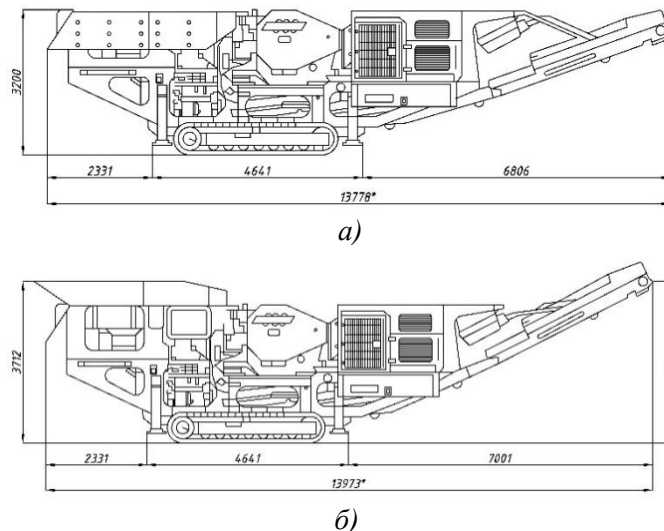


Рис.2. Транспортна (а) та робоча (б) конфігурації щокрової дробильної установки J40
 Fig.2. Transport (a) and working (b) configurations of the J40 jaw crusher

Транспортна характеристика вантажу:

- фізичний стан вантажу – поштучний;
- маса найменшого можливого вантажного місця – 36,94 тон;
- клас за масою відповідно до вимог охорони праці – важковагові, які підлягають навантаженню із застосуванням піднімальних механізмів;
- габарити найменшого можливого вантажного місця – 3,2/2,5/13,78 м;
- потреба захисту від впливу довкілля – потребує захисту від випадкових механічних пошкоджень, перекидання;
- особливі вимоги – необхідність кріплення до каркасу причепа/напівпричепа.

Технічні умови на перевезення є вихідними даними для вибору компоувальної схеми автопоїзда, підбору причіпного транспортного засобу, розрахунку навантаження на осі.

5. Результати. Причіпний транспортний засіб(причіп) – це автономний транспортний засіб, що не має власного двигуна і приводиться у рух з допомогою тягового транспортного

засобу(тягача). Причепи слугують для розширення транспортних можливостей, насамперед у вантажних перевезеннях.

Поділяються на два типи: причепи та напівпричепи, що розрізняються за механізмами кріплення.

Причип передає вагу вантажу на дорогу через несучу раму розподіляючи її через власні осі. Тягач у даному випадку лиш забезпечує переміщення причепа. Напівпричип передає вагу вантажу на несучу раму, розподіляючи її як на власні осі, так і на осі тягача.

Причипні транспортні засоби бувають різних конфігурацій: тентовані, бортові, рефрижераторні, цистерни, трали, платформи, самоскиди тощо.

Для переміщення великогабаритних і великовагових вантажів використовуються трали. Трал – це вантажний причип, обладнаний платформою для встановлення, закріплення і переміщення вантажу.

Обираючи трал для перевезення великогабаритних та великовагових вантажів необхідно зосередитися на їх ключових характеристиках, а саме: дорожній просвіт, кут нахилу для в'їзду, навантажувальна висота, положення платформи, радіус розвороту, вантажопідйомність, стійкість.

Трали класифікуються за наступними параметрами і характеристиками[10]:

1. За вантажопідйомністю:

- легка (до 25 тон вантажу);
- середня (до 45 тон вантажу);
- важка (до 110 тон вантажу);
- надважка (понад 110 тон).

2. За кількістю осей:

- від 3 до 9 осей (легка, середня та важка вантажопідйомність);
- від 10 осей (надважка вантажопідйомність).

3. За висотою навантаження:

- висококаркасні(висота вантажної платформи над землею становить приблизно 1 м);
- низькокаркасні(висота вантажної платформи над землею становить від 0,85-0,95 м);
- спеціалізовані трали (висота вантажної платформи над землею становить 0,4-0,7 м).

4. За типом підвіски [10]:

- ресорна, ресорно-балансирна підвіска (використовується як на низькорамних, так і на високорамних тралах);

- пневматична підвіска (використовується на тих тралах, які мають дуже низьку висоту платформи для підвищення безпеки вантажу);

- гідравлічна підвіска (використовується на найважчих тралах, які перевозять вантажі понад 100 тон);

- балансирна підвіска (використовується на високонавантажених платформах і не має жодних пружин).

5. За способом навантаження:

- з завантаженням зверху;
- з заїздом ззаду;
- з переднім заїздом.

Звичайні трали, пристосовані для великогабаритного обладнання, були призначені для завантаження великої техніки за допомогою кранів. Зі збільшенням ваги вантажів трали почали оснащувати відкидними трапами(апарелями) з гідравлічними або механічними механізмами, що значно спростило процес завантаження самохідних машин [10](рис.3).



Рис.3. Трал з заїздом ззаду
Fig.3. Trawl with drive-in from behind

Трал з переднім в'їздом (рис. 4) не потребує відкидної апарелі. Поява таких напівпричепів з гусаком, що відстібається, і заниженою передньою частиною платформи уможливила завантаження спереду, що особливо зручно в умовах обмеженого простору[10].



Рис.4. Трал з переднім заїздом
Fig.4. Trawl with drive-in from front

Напівпричепи з розсувною платформою (рис. 5) є універсальним рішенням для вантажів із різними параметрами. Їх телескопічна конструкція та пневматичні замки для фіксації секцій у розсунутому положенні полегшують транспортування довгомірних вантажів або декількох одиниць самохідної техніки одночасно. Завантаження вантажу відбувається з допомогою кранів.



Рис.5. Трал з розсувною платформою
Fig.5. Trawl with a sliding platform

Трали, які призначені для перевезення нестандартних вантажів, можуть бути обладнані різними додатковими механізмами, включаючи уширювачі, знімні або стаціонарні апарелі, які можуть складатися або не складатися.

Для перевезення мобільної ДСУ обрано спеціальну причіпну техніку – низькорамний трал. Низькорамна конструкція спрощує завантаження та розвантаження дробарки та зменшує загальну висоту вантажу. Окрім цього, трали оснащені надійними системами підвіски, які можуть справлятися з нерівним рельєфом, що часто зустрічається на будівельних та гірничодобувних майданчиках.

На рис.6 наведено приклад перевезення мобільної щоклової дробарки з використанням низькорамних напівпричепів.



Рис.6. Транспортування мобільних щоклових дробарок з використанням низькорамних напівпричепів

Fig.6. Transportation of mobile jaw crushers using low-frame semi-trailers

Для того аби переміщувати причіп з вантажем використовують вантажні тягачі, що характеризуються спеціалізацією на перевезенні конкретних вантажів, що зумовлює існування широкого спектра їх підтипів. Відмінності між ними переважно полягають у потужності двигунів та конфігурації додаткового обладнання. Тягачі поділяють на два основні типи: сідлові та буксирні. Буксирні тягачі призначені для переміщення причепів, при цьому тягач не сприймає на осі навантаження від маси причепа. Сідлові тягачі використовуються для переміщення напівпричепів. Склад тягача з напівпричепом дозволяє розподіляти навантаження на кілька осей, оскільки частина навантаження від напівпричепа через сидільно-зчіпний механізм передається безпосередньо тягачу.

Під час вибору конкретної комбінації тягач+причіп/напівпричіп необхідно враховувати критичні параметри, які впливають як на вантажопідйомність, так і на безпеку експлуатації. Першим фактором є обмеження загальної дозволеної маси, встановлене українськими правилами дорожнього руху. Загальна максимально дозволена маса це максимально допустима повна маса транспортного засобу, що залежить від конкретної конфігурації осей обраної пари тягача та напівпричепа.

Другим фактором є незалежне від дозволеної максимальної маси навантаження на кожну вісь. Обмеження по навантаженню на вісь забезпечують безпечний розподіл ваги на дорожню інфраструктуру та мінімізують потенційні пошкодження.

Для перевезення мобільної щоклової дробарки моделі J40 можна використати одну з наведених нижче схем компонування тягача і причіпного складу (рис. 7).

Схема транспортування, що передбачає використання спеціалізованого низькорамного двовісного причепа (рис.7, а) має ряд переваг. Такий причіп дозволяє перевозити важку техніку масою до 19 т. Конструкція причепа відрізняється максимальною маневреністю, що є критично важливим фактором під час руху в обмеженому просторі. Ще однією суттєвою перевагою даної схеми є зручність самостійного завантаження техніки на платформу шляхом заїзду. Однак використання двовісного причепа має і недоліки – недовикористання вантажності автомобілів-тягачів, яке призводить до зниження коефіцієнту зчеплення ведучих осей тягача з дорожньою поверхнею, збільшення навантаження на осі причепа та впливає на економічність транспортування.

Схема із застосуванням спеціалізованого тривісного низькорамного причепа (рис. 7, б) відрізняється вантажопідйомністю. Наведений на схемі причіп здатен перевозити вантажі масою до 25 т, що розширює транспортні можливості. Проте, головний недолік, характерний для трьохвісного варіанту – недостатнє завантаження тягача. Більш того, подібні автопоїзди вирізняються низькою прохідністю на пересіченій місцевості, що обмежує їх застосування на ґрунтових дорогах, будівельних майданчиках та інших ділянках з нерівним покриттям.

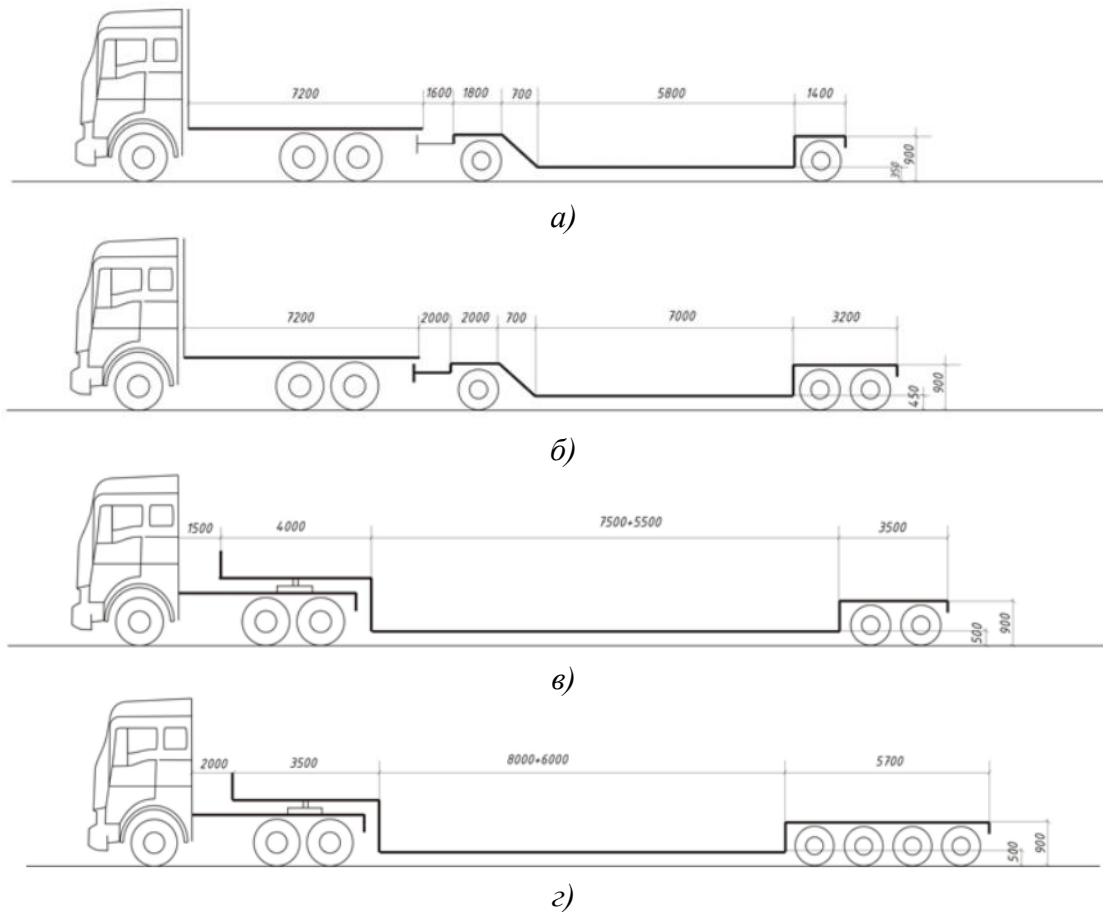


Рис.7. Схеми компонування автопоїздів для перевезення мобільної щокрової дробарки
 Fig.7. Layout schemes of road trains for the transportation of a mobile jaw crusher

Транспортування із застосуванням напівпричепів (рис. 7, в, г). Такі напівпричепи відрізняються більшою маневреністю та високою вантажопідйомністю (50 т і більше). Водночас, головним недоліком подібних рішень є загальна довжина, яка може становити серйозну перешкоду під час руху в міських умовах або на ділянках з обмеженим простором.

Проаналізувавши усі варіанти, перевагу надано схемі на рис. 7. г з використанням чотиривісного трала напівпричепи. Завантаження техніки на подібний напівпричіп здійснюється самостійним заїздом без використання кранів.

Для порівняння параметрів низькорамних тралів для перевезення мобільної дробильно-сортувальної установки J40 виконано пошук причіпних транспортних засобів, представлених на ринку. Вантажопідйомність повинна бути не меншою ніж 37 тон.

У результаті пошуку на ринку були обрані моделі низькорамних тралів напівпричепів з 4 осями і повною масою від 55 до 75 тон. Їх характеристики внесені у таблицю 2.

Критеріальне порівняння причепів виконано за наступними критеріями:

- відношення вантажопідйомності m_B до маси причепа (спорядженої маси) m_{Π} :

$$K_1 = \frac{m_B}{m_{\Pi}} \rightarrow \max \quad (1)$$

- відношення маси причепа m_{Π} до максимальної довжини причепа l_{Π} :

$$K_2 = \frac{m_{\Pi}}{l_{\Pi}} \rightarrow \min \quad (2)$$

Важливими критеріями для відбору є можливість розширення бази причепа як у довжину так і у ширину. Розраховані значення критеріїв внесені у відповідні графі таблиці 3.

Таблиця 2. Характеристики чотиривісних низькорамних тралів з повною масою від 55 до 75 тон
 Table 2. Characteristics of four-axle low-frame trawlers with a gross weight from 55 to 75 tons

Модель	Повна маса, кг	Споряджена маса, кг	Вантажопідйомність, кг	Ширина (ширина з розширенням), мм	Довжина загальна (з подовженням), мм	Зображення
Donat 4 axle extendable lowbed semi trailer	62000	12000	50000	2550 (3150)	14600 (20600)	
TAD Telescop 50-4	69000	19000	50000	2500	20380 (56380)	
Kassbohrer LB4E	63800	13806	49994	2550 (3150)	9240 (15240)	
Fesan 4 axles lowbed	66000	15000	51000	3300	14200	
Nova Lowbed Trailer	62000	12000	50000	2550	13600	
Scorpion Trailer 4 AXLE	66000	11000	55000	3800	9550	
Fliegl SDS 570T	56900	9900	47000	2520	9000	
Faymonville N4LAU MV RM	73000	14600	58400	2540 (3200)	9200 (12400)	
Özgül LW4 a	68000	12000	56000	2550	10500	

Таблиця 3. Результати розрахунку критеріїв для порівняння причепів
 Table 3. Results of the calculation of criteria for comparing trailers

Модель	K_1	K_2	Можливість видовження транспортної бази	Можливість розширення транспортної бази
Donat 4 axle extendable lowbed semi trailer	4,2	0,58	є	є
TAD Telescop 50-4	2,63	0,33	відсутня	є
Kassbohrer LB4E	3,62	0,9	є	є
Fesan 4 axles lowbed	3,4	1,05	відсутня	відсутня
Nova Lowbed Trailer	4,2	0,88	відсутня	відсутня
Scorpion Trailer 4 AXLE	5	1,15	відсутня	відсутня
Fliegl SDS 570T	4,7	1,1	відсутня	відсутня
Faymonville N4LAUMV RM	4	1,17	є	є
Özgül LW4 a	4,6	1,14	відсутня	відсутня

За результатами даних, що наведені у таблиці 3 побудовані гістограми відношення вантажопідйомності m_B до маси причепа(спорядженої маси) m_{Π} (рис.8), відношення маси причепа m_{Π} до максимальної довжини причепа l_{Π} (рис.9).

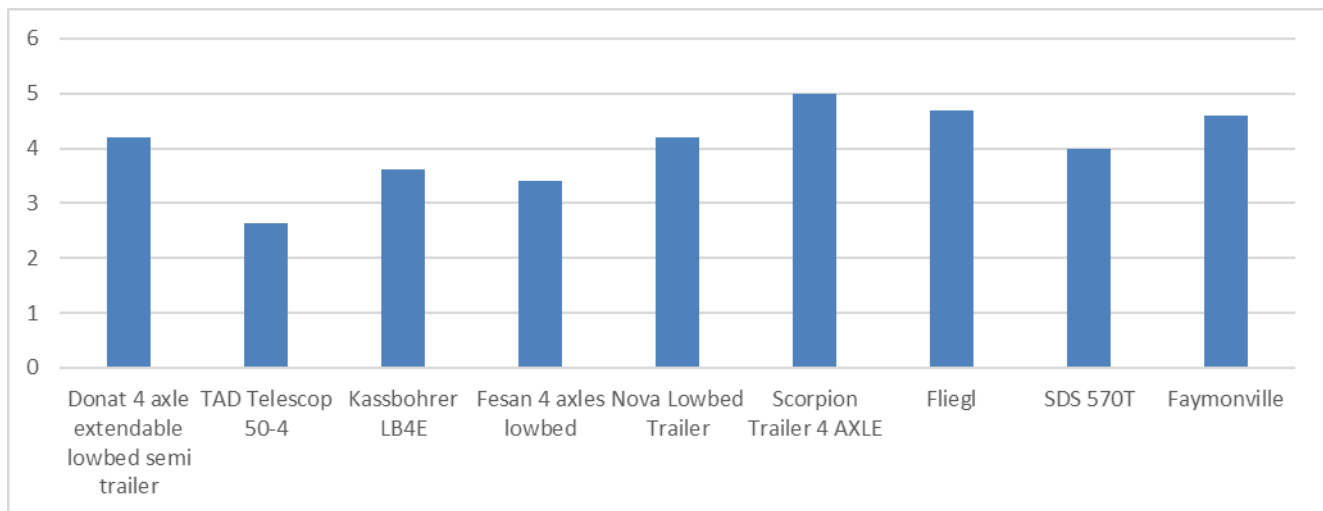


Рис.8. Результати розрахунку критерія K_1
 Fig.8. Results of the calculation of criterion K_1

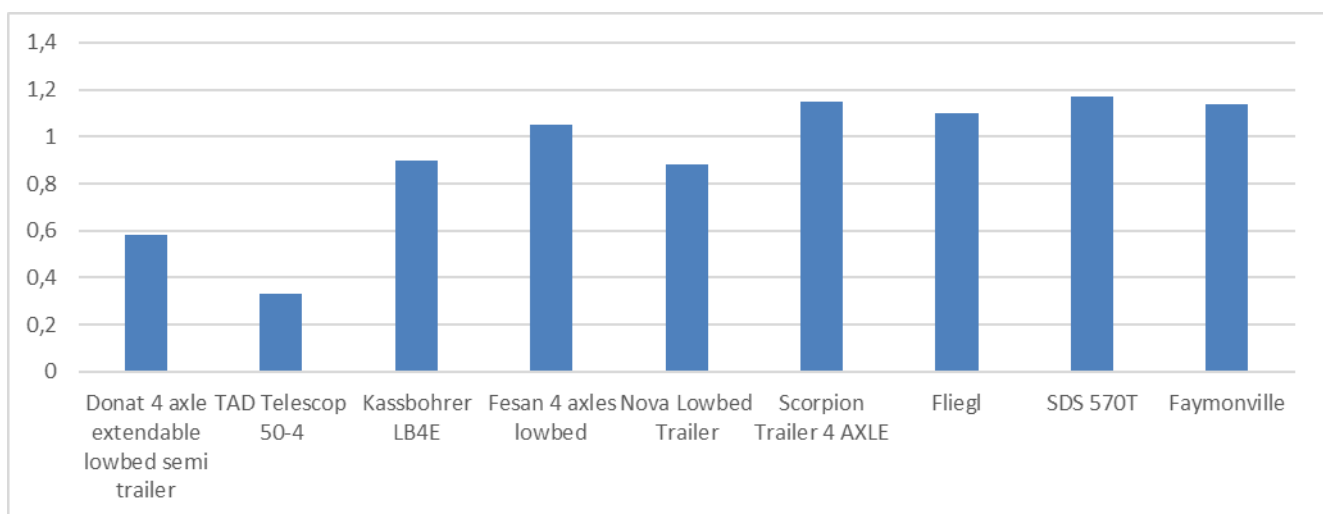


Рис.9. Результати розрахунку критерія K_2
 Fig.9. Results of the calculation of criterion K_2

6. Висновки. Виконані дослідження дозволили виявити основні конструкції причіпних транспортних засобів, які призначені для перевезення великогабаритних і великовагових вантажів. Проведено аналіз різноманітних схем компоновання тягача і причепа/напівпричепа у результаті чого визначено недоліків і переваги їх використання. Найбільш придатною схемою для перевезення мобільної дробильно-сортувальної установки J40 є використання низькорамного чотиривісного трала напівпричепа з тривісним тягачем, що дозволить максимально використати вантажопідйомність як тягача так і напівпричепа, рівномірно розподілити навантаження між осями автопоїзда в межах, визначених правилами дорожнього руху і забезпечить високий коефіцієнт зчеплення ведучих коліс тягача з дорожнім покриттям.

Порівняння характеристик причіпних транспортних засобів (таблиця 2), представлених на ринку, виявило, що критерії різняться у досить широких межах для транспортних засобів у межах однієї групи вантажопідйомності.

За критерієм K_1 (рис.8), найкраще співвідношення вантажопідйомності до спорядженої маси мають причепа: Donat 4 axle extendable lowbed semi trailer, Scorpion Trailer 4 AXLE Fliegl SDS 570T, Faymonville N4LAUMV RM. Вони мають найменш металоємну конструкцію, що безперечно є перевагою при виборі транспортного засобу.

За критерієм K_2 (рис.9) відношення маси причепа до максимальної довжини причепа найбільш ефективними конструкціями є причепа: Donat 4 axle extendable lowbed semi trailer, TAD Telescop 50-4, Nova Lowbed Trailer. Ці трейлери дозволяють при найменшій масі причепа отримати найбільше транспортної бази.

Можливості розширення і подовження транспортної бази надають конструкції таких причепів: Donat 4 axle extendable lowbed semi trailer, Faymonville N4LAUMV RM, Kassbohrer LB4E. Така функція дозволяє виконувати перевезення різного за габаритами обладнання. При цьому у порожньому стані вони мають якнайменшу ширину і тим самим зменшують складність їх руху по автомобільним шляхам.

Розуміння конструкцій транспортних засобів, знання їх параметрів, а також переваг і недоліків їх використання у тих чи інших ситуаціях дозволить більш точно обирати устаткування відповідно умов перевезення і характеристик вантажу.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення навантажень, що діють на елементи конструкцій причіпних транспортних засобів у процесі транспортуванні будівельного устаткування, з метою їх модернізації.

Список використаних джерел:

1. Шуваєв А.А. Інструментарій залучення відходів будівництва та зносу до повторного господарського циклу в контексті їх класифікаційних ознак. Грааль науки, 2021. №10. С. 600-605.
2. Шпакова Г.В. Можливість рециклінгу будівельних відходів в Україні. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин, 2012. № 26. С. 137-142.
3. Can you recycle concrete? [Електронний ресурс] URL: <https://www.nationwideconcreting.co.uk/news/can-you-recycle-concrete> [дата звернення: 19.06.2024].
4. Дьяченко О.С., Анопко А.Є., Гох В.В. Огляд технологій переробки відходів будівельної галузі і можливість їх використання при переробці зруйнованих будівель і споруд. IV Міжнародна науково-практична конференція Енергоощадні машини і технології, 2023. С. 21-24.
5. Назаренко І.І. Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій: Посібник / уклад. І.І. Назаренко, Ю.О. Баранов, М.О. Клименко. – К.: КНУБА, 2009. – 84 с.
6. Muller A., Martins I. Plants for the treatment of construction and demolition waste. Recycling of building materials, 2022. P. 127-147.
7. Мельник О. Аналіз поняття «негабаритні вантажі» в загальній системі класифікації вантажів. Дослідження особливостей транспортного флоту для організації процесу перевезень негабаритних вантажів. Транспортні системи і технології, 2020. № 35. С. 169-181.

8. Аратюнян І. А., Шуваяєв А. А. Екологічно-економічна доцільність комплексного управління потоками відходів в будівельній галузі. Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, 2020. №18. С. 9-17.
9. UJ440i Jaw crusher [Електронний ресурс] URL: <https://www.rockprocessing.sandvik/en/products/Mobile-crushers-and-screens/tracked-crushers-and-screens/mobile-jaw-crushers/uj440i-mobile-jaw-crusher/> [дата звернення: 19.06.2024].
10. Thrall is what? Types and characteristics of trawls [Електронний ресурс] URL: <https://en.bir-miss.com/thrall-is-what-types-and-characteristics-of-trawls/> [дата звернення: 19.06.2024].

References:

1. Shuvaiev A.A. (2021) Instrumentarii zaluchennia vidkhodiv budivnytstva ta znosu do povtornoho hospodarskoho tsykladu v konteksti yikh klasyfikatsiinykh oznak. [Toolkit for the involvement of construction and demolition waste in the repeated economic cycle in the context of their classification features.]. The grail of science. №10. P. 600-605.
2. Shpakova H.V. (2012) Mozhlyvist retsyklinhu budivnykh vidkhodiv v Ukraini. Shliakhy pidvyshennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn. [The possibility of recycling construction waste in Ukraine. Ways of increasing the efficiency of construction in the conditions of the formation of market relations] № 26. P. 137-142.
3. Can you recycle concrete? [Electronic resource] URL: <https://www.nationwideconcreteing.co.uk/news/can-you-recycle-concrete> [date of application: 19.06.2024].
4. Diachenko O.S., Anopko A.Ie., Hokh V.V. (2023) Ohliad tekhnolohii pererobky vidkhodiv budivelnoi haluzi i mozhlyvist yikh vykorystannia pry pererobtsi zruinovanykh budivel i sporud. IV Mizhnarodna naukova-praktychna konferentsiia Enerhooshchadni mashyny i tekhnolohii [Overview of waste processing technologies of the construction industry and the possibility of their use in the processing of destroyed buildings and structures. IV International scientific and practical conference Energy-saving machines and technologies] P. 21-24.
5. Nazarenko I.I., Baranov O.Yu., Klymenko M.O. (2009) Mashyny dlia vyrobnytstva budivnykh materialiv i konstruktsii: Posibnyk [Machines for the production of building materials and structures: Manual]. Kyiv: KNUBA. 84 p.
6. Muller A., Martins I. (2022) Plants for the treatment of construction and demolition waste. Recycling of building materials, P. 127-147.
7. Melnyk O. (2020) Analiz poniattia «nehabarytni vantazhi» v zahalnoi systemi klasyfikatsii vantazhiv. Doslidzhennia osoblyvostei transportnoho flotu dlia orhanizatsii protsesu perevezen nehabarytnykh vantazhiv. [Analysis of the concept of "oversized cargo" in the general cargo classification system. Study of the peculiarities of the transport fleet for the organization of the process of transportation of oversized cargo]. Transport systems and technologies, №35. P. 169-181.
8. Aratiunian I. A., Shuvaiev A. A. (2020) Ekolohichno-ekonomichna dotsilnist kompleksnoho upravlinnia potokamy vidkhodiv v budivelnii haluzi. Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka. [Ecological and economic feasibility of integrated management of waste flows in the construction industry]. Bridges and tunnels: theory, research, practice, №18. P. 9-17.
9. UJ440i Jaw crusher [Electronic resource] URL: <https://www.rockprocessing.sandvik/en/products/Mobile-crushers-and-screens/tracked-crushers-and-screens/mobile-jaw-crushers/uj440i-mobile-jaw-crusher/> [date of application: 19.06.2024].
10. Thrall is what? Types and characteristics of trawls [Electronic resource] URL: <https://en.bir-miss.com/thrall-is-what-types-and-characteristics-of-trawls/> [date of application: 19.06.2024].

УДК69.00.25

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0304>**Андрій Заприво́да**

кандидат технічних наук,
доцент кафедри Будівельних машин,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітряних сил 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4142-9703>
E-mail: balaka.mm@knuba.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗСІЯННЯ ЕНЕРГІЇ ЗА ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОЮ МОДЕЛЮЮ ДВОМІСНОЮ ВІБРАЦІЙНОЮ СИСТЕМОЮ

АНОТАЦІЯ. В роботі досліджено енергію процесу коливань за дискретною моделлю двомісної вібраційної системи «робочий орган машини- ущільнюоче середовище». Виявлено, що з малим розсіюванням енергії в разі дії сили на одну з мас при заданій амплітуді коливань цієї маси відношення амплітуд коливань в резонансному режимі визначається тільки параметрами другої маси і співвідношенням між масами. Визначені умови впливу дисипації в режимі резонансу на частоті, близькій до часткової частоти тої маси, на яку діє зовнішня сила. При цьому різниця між силою інерції, що діє на другу масу і силою пружності не дорівнює нулю. Тому вплив дисипації незначний. У разі резонансу на частоті, викликаній другою масою роль сил розсіювання зростає. Розсіяння енергії, що пов'язане з масою на яку діє зовнішня сила, здійснює істотний вплив на частоту першого резонансу. Отримані результати досліджень є важливою інформацією для проектування вібраційних машин даного класу, в тому числі поверхневих машин для улаштуванні бетонних доріг.

Ключові слова: енергія, двомісна вібраційна система, резонанс, параметри, амплітуда, частота коливань.

1. Постановка проблеми. Вібраційні машини широко використовуються в будівельній індустрії при формуванні бетонних і залізобетонних виробів та в дорожньому будівництві при ущільненні ґрунтів та улаштуванні асфальтобетонних та бетонних доріг. Їх робота характеризується значними витратами енергії, що обумовлено рядом причин, в тому числі використанням неефективних режимів та параметрів. Одна із причин такого стану вібраційного обладнання є складність протікання технологічного процесу, застосування емпіричних залежностей для розрахунку енергетичних параметрів, що приводить в реальному процесі до розбіжності розрахункових та дійсних числових значень параметрів. Тому актуальною є проблема розробки теорії руху такого класу машин, побудована на використанні фізичних моделей, що враховують ті властивості і характеристики, які адекватно відображають поведінку ущільнюючих матеріалів. Та застосування математичних моделей, що описують реальний процес роботи вібраційної техніки. В роботі використовуються дискретно – континуальні моделі, які є найбільш наближеними до реальних умов роботи.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Дослідженню та визначенню енергетичних показників вібраційної техніки присвячено ряд робіт. Так, в роботі [1] при дослідженні вібромайданчика з просторовими коливаннями використана дискретна модель. В роботі [2] використана дискретна модель в дослідженнях процесів сортування вібраційним грохотом. В роботі [3] при моделюванні вібраційного змішувача приведена дискретна модель. Отримані результати досліджень в рамках дискретної моделі справедливі виключно в межах проведених досліджень. Дискретно-континуальна модель прийнята в роботах [4,5] є більш реальною, проте закони зміни властивостей ущільнюючого матеріалу потребують корекції. Для можливого моделювання процесу розсіяння енергії можна використати критерії подібності [4,6]. Таким чином, на основі приведенного аналізу літературних джерел можна констатувати, що існує проблема подальшого вдосконалення теорії руху вібраційних машин. Вона має бути побудована на використанні фізичних моделей, що враховують ті властивості і характеристики, які адекватно відображають поведінку ущільнюючих матеріалів.

3. Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розробка моделі та дослідження й визначення розподілу енергії в елементах системи «вібраційна машина – ущільнююча бетонна суміш». Для досягнення мети дослідження визначені наступні завдання:

- обґрунтування та вибір методу дослідження енергії в елементах системи «вібраційна машина – ущільнююча бетонна суміш»;
- дослідження енергії в елементах системи «вібраційна машина – ущільнююча бетонна суміш».

4. Обґрунтування та вибір методу дослідження енергії в елементах системи «вібраційна машина – ущільнююча бетонна суміш».

Як відомо [4] будь-якій коливальній системі притаманні маса, пружність і опір або розділені по окремим частинам системи (дискретні системи), або кожний будь-який шар володіє цими властивостями (континуальні системи). Вочевидь виникає запитання, щодо можливого застосування дискретної моделі як більш спрощеної за безумовним забезпеченням допустимих похибок при розрахунках. Щоби відповісти на подібне запитання у якості вихідної можна взяти модель з розподіленими (континуальними) властивостями і оцінити якісну картину часу розповсюдження хвиль у порівнянні з періодом коливань. Дійсно, якщо в середовищі під дією тої чи іншої сили то деформація буде розповсюджуватися зі швидкістю

$$c = \sqrt{E/\rho}, \quad (1)$$

де E – модуль пружності; ρ – щільність середовища.

Вочевидь, що стан пружного збурення буде розповсюджений на відстань l за час

$$\tau = l/c = l\sqrt{\rho/E}, \quad (2)$$

Якщо $\tau < T$, де T період коливань ($T = 2\pi/\omega$), то за час τ фаза коливань практично не змінюється, що в результаті відображає розподіл параметрів процесу (наприклад, амплітуди коливань) без зміни за знаком. Якщо фаза прискорення частинок в шарі середовища співпадає з фазою змушуючої сили, тоді система (середовище) веде себе як абсолютно тверде тіло і пружними властивостями можна знехтувати. Якщо процес є таким, що переміщення частинок шару співпадає по фазі із змушуючою силою, то система веде себе як ідеальна пружність, вплив маси на характер вимушених коливань є незначним. Якщо виконується умова $\tau \geq T$, тобто лінійні розміри системи, в якій розповсюджуються хвилі, стають рівними або більшими на довжину хвилі λ ($\lambda = c/T$), то в цьому випадку шляхом відбиття хвиль від границь, суперпозицією хвиль виникає складне хвильове поле з визначеним розподілом фаз. І в такому випадку систему необхідно розглядати як систему з розподіленими параметрами. Виходячи із наведених міркувань вібраційна систем «робочий орган машини- ущільнююче середовище» за різними ознаками їх поведінки вони представляють собою з точки зору моделювання як підсистем з дискретними (машина) і розподіленими (середовище) параметрами. В'язкі властивості моделюються демпфером, який складається з поршня, що переміщується в циліндрі з рідиною. Можливі і інші з'єднання елементів між собою, що обумовлюється необхідністю врахуванням тих чи інших властивостей та складу компонентів реальної тої чи іншої суміші. Рівняння, що описують розповсюдження хвильового процесу в суміші можна представити в такому вигляді:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t}; \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 (1 + i\gamma) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Перше рівняння (3) описує переміщення шару суміші $u(z, t)$, як пружного тіла щільністю ρ зі швидкістю c . Друге рівняння (3) описує рух суміші як пружно – в'язкого тіла щільністю ρ з частото залежним розсіянням енергії, що враховується в рівнянні коефіцієнтом η . Третє рівняння (5.1) описує рух суміші, як пружно – в'язкого тіла щільністю ρ з частото

незалежним розсіянням енергії, що враховується в рівнянні коефіцієнтом γ . Перше рівняння (3) не може бути застосоване у випадку можливого резонансу, оскільки в зоні резонансу відсутність дисипативної складової дає рішення для амплітуди коливань $A \rightarrow \infty$. Тому для вибору залишаються друге і третє рівняння (3). На сучасному етапі розвитку вібраційної технології ущільнення будівельних сумішей третє рівняння (3) більше застосовується, внаслідок того, що для конкретної частоти коливань напружений стан визначається амплітудою коливань. Тому в подальших аналітичних дослідженнях використовується третє рівняння (3).

5. Дослідження енергетики вібраційної системи. Дослідження енергетики вібраційної системи здійснюється як системи з двома степенями волі, що є першою передумовою. Другою передумовою є допущення, що вібраційна машина являється зосередженими абсолютно твердими масами m_1 m_2 , (рис.1), 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 . При цьому маса складається із маси форми m_f та маси бетонної суміші $m_{б.с.}$, яка визначається на заключній стадії за методикою роботи [4]. Тобто за формою маємо дискретну модель (рис1), а при виконанні розрахунків враховуються хвильові явища, що виникають в бетонній суміші, тобто дискретно-континуальну вібраційну систему.

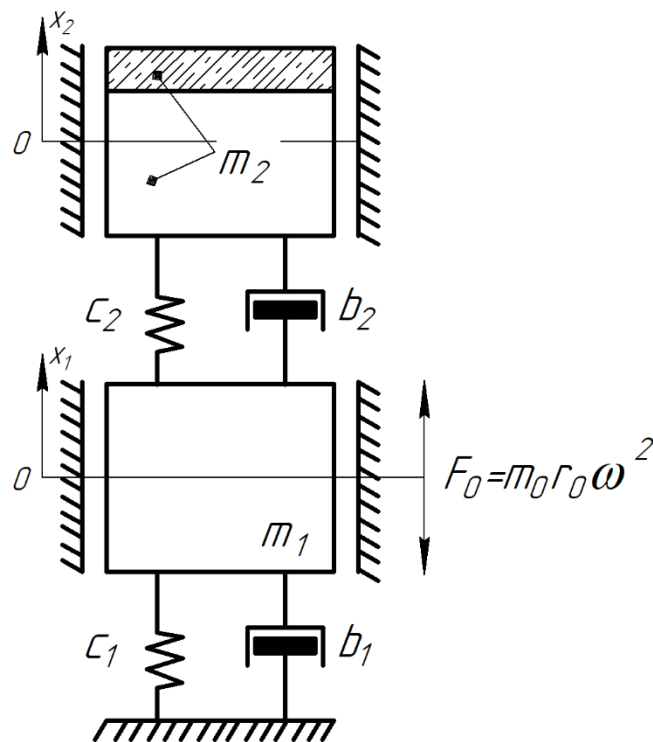


Рис. 1 Схема двомісної машини

Всі пружні властивості моделюються лінійними пружинами із коефіцієнтами пружності c_1 та c_2 . Опір коливанням моделюється демпфером, що відбиває в'язкий характер опору з коефіцієнтом b , ($H \cdot c/m$). Такий вид опору, як відомо, пропорційний швидкості руху, що дає нам можливість спростити аналіз його впливу на коливання робочого органу.

Колівання мас можуть бути синфазними і протифазними. При цьому значення переміщення x_1 , і x_2 можуть бути рівними ($x_1 = x_2$) або різними ($x_1 < x_2$ і $x_1 > x_2$). Напрямок і значення переміщення мас залежать від співвідношення мас, жорсткості пружних зв'язків, частоти коливань, опору і фазових кутів. В процесі коливань під дією змушувальної сили $F(t)$ в пружинах виникають зусилля $F_1 = c_1 x_1$ і $F_2 = c_2 (x_2 - x_1)$, де c_1, c_2 – коефіцієнти жорсткості пружин; x_1, x_2 – переміщення мас m_1 і m_2 ; $F(t) = F_0 \cos \omega t$ – зовнішня змушуюча сила.

Застосовуючи метод Даламбера [4] отримаємо рівняння руху вигляд:

$$m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) = F_0 \cos \omega t \quad (4)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + b_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_2 (x_2 - x_1) = 0$$

Спочатку визначимо енергію в режимі вільних коливань. Диференційні рівняння, що описують вільні коливання системи (мають вигляд

$$m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + b_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_1 x_1 + c_2 (x_1 - x_2) = 0; \quad (5)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + b_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_2 (x_2 - x_1) = 0.$$

Для рішення рівнянь (5) представимо його у матричній формі:

$$\begin{vmatrix} m_1 p^2 + (b_1 + b_2) p + c_1 + c_2 & -(b_2 p + c_2) \\ -(b_2 p + c_2) & m_2 p^2 + b_2 p + c_1 + c_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

Оскільки за умовою задачі переміщення мас m_1 і m_2 не дорівнює нулю: $x_1 \neq 0$, $x_2 \neq 0$, то рівними нулю буде визначник системи.

$$\begin{vmatrix} m_1 p^2 + (b_1 + b_2) p + c_1 + c_2 & -(b_2 p + c_2) \\ -(b_2 p + c_2) & m_2 p^2 + b_2 p + c_2 \end{vmatrix} = 0.$$

Розкриємо визначник системи (6):

$$p^4 m_1 m_2 + p^3 (m_1 b_2 + m_2 b_1 + m_2 b_2) + p^2 (m_1 c_2 + m_2 c_1 + m_2 c_2 + b_1 b_2) + p (c_1 b_2 + c_2 b_1) + c_1 c_2 = 0.$$

Використовуючи метод комплексних чисел дане рівняння напишемо у вигляді:

$$p_{1,2} = -h_1 \pm i\omega_{11}; p_{3,4} = -h_2 \pm i\omega_{12}, \quad (7)$$

де i - мнима одиниця; h_1, h_2 - приведені коефіцієнти дисипації параметрами ω_{11}, ω_{12} - власні частоти коливань мас m_1 і m_2 з урахуванням розсіяння енергії.

Напишемо переміщення x_1 і x_2 мас m_1 і m_2 із урахуванням (7) у вигляді:

$$\begin{aligned} x_1 &= \bar{x}_{a1} e^{p_1 t} + \bar{x}_{a1}^* e^{p_2 t} + \bar{x}_{b1} e^{p_3 t} + \bar{x}_{b1}^* e^{p_4 t}; \\ x_2 &= \bar{x}_{a2} e^{p_1 t} + \bar{x}_{a2}^* e^{p_2 t} + \bar{x}_{b2} e^{p_3 t} + \bar{x}_{b2}^* e^{p_4 t}. \end{aligned} \quad (8)$$

Здійснивши підстановку (8) у (7) отримаємо систему комплексних величин:

$$\begin{aligned} \bar{k}_1 &= \frac{\bar{x}_{a2}}{\bar{x}_{a1}}; \bar{k}_2 = \frac{\bar{x}_{a2}^*}{\bar{x}_{a1}^*} = \bar{k}_1^*; \bar{k}_3 = \frac{\bar{x}_{b2}}{\bar{x}_{b1}}; \bar{k}_4 = \frac{\bar{x}_{b2}^*}{\bar{x}_{b1}^*} = \bar{k}_3^*; \\ \bar{k}_n &= \frac{m_1 p_i^2 + (b_1 + b_2) p_i + c_1 + c_2}{b_2 p_i + c_2} = \frac{b_2 p_i + c_2}{m_1 p_i^2 + b_2 p_i + c_2}, \\ n &= 1 \div 4. \end{aligned} \quad (9)$$

Враховуючи (7) і (9), рішення коливань вібраційної системи (8) буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} x_1 &= \bar{x}_{a1} e^{(-h_1+j\omega_{11})t} + \bar{x}_{a1}^* e^{(-h_1+j\omega_{11})t} + \bar{x}_{b1} e^{(-h_2+j\omega_{12})t} + \bar{x}_{b1}^* e^{(-h_2+j\omega_{12})t}; \\ x_2 &= \bar{k}_1 \bar{x}_{a1} e^{(-h_1+j\omega_{11})t} + \bar{k}_2 \bar{x}_{a1}^* e^{(-h_1+j\omega_{11})t} + \bar{k}_3 \bar{x}_{b1} e^{(-h_2+j\omega_{12})t} + \bar{k}_4 \bar{x}_{b1}^* e^{(-h_2+j\omega_{12})t}. \end{aligned} \quad (10)$$

Введемо наступні позначення комплексних величин $\bar{x}_{a1}, \bar{x}_{b1}, \bar{k}_1 - \bar{k}_4$ у вигляді:

$$\begin{aligned} \bar{x}_{a1} &= \frac{1}{2} x_{a1} e^{j\varphi_1}; \bar{x}_b = \frac{1}{2} x_{b1} e^{j\varphi_2}; \bar{x}_{a1}^* = \frac{1}{2} x_{a1} e^{-j\varphi_1}; \bar{x}_{b1}^* = \frac{1}{2} x_{a1} e^{-j\varphi_1}; \\ \bar{k}_1 &= k_1 e^{j\alpha_1}; \bar{k}_3 = k_2 e^{j\alpha_2}; \bar{k}_2 = k_1 e^{-j\alpha_1}; \bar{k}_4 = k_2 e^{-j\alpha_2}; \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} k_i &= \sqrt{a_{ki}^2 + b_{ki}^2}; \alpha_i = \text{arctg} \frac{b_{ki}}{a_{ki}}; \\ \alpha_{ki} &= \frac{1}{(c_2 - b_2 h_i)^2 + \omega_i^2 b_2^2} \left[-b_2 h_i^3 m_1 + b_2 h_i^2 (b_1 + b_2) - \right. \\ &\quad \left. - b_2 h_i c_1 + m_1 h_i \omega_i^2 b_2 + c_2 m_1 h_i^2 - 2b_2 c_2 h_i - c_2 m_1 \omega_i^2 - \right. \\ &\quad \left. h_i c_2 b_1 - c_2 (c_1 + c_2) \right]; \\ b_{ki} &= \frac{1}{(c_2 - b_2 h_i)^2 + \omega_i^2 b_2^2} \left[m_1 b_2 h_i^2 \omega_i + m_1 \omega_i^3 b_2 - \right. \\ &\quad \left. - b_2 \omega_i (c_1 + c_2) - 2m_1 h_i \omega_i c_2 + c_2 (b_1 + b_2) \right]. \\ &i = 1, 2 \end{aligned}$$

Вносимо ці позначення в (10):

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{2} x_{a1} e^{(-h_1+j\omega_{11})t+j\varphi_1} + \frac{1}{2} x_{a1} e^{(-h_1+j\omega_{11})t-j\varphi_1} + \\ &\quad \frac{1}{2} x_{b1} e^{(-h_2+j\omega_{12})t+j\varphi_2} + \frac{1}{2} x_{b1} e^{(-h_2+j\omega_{12})t-j\varphi_2}; \\ x_2 &= \frac{1}{2} k_1 x_{a1} e^{(-h_1+j\omega_{11})t+j(\varphi_1+\alpha_1)} + \frac{1}{2} k_1 x_{a1} e^{(-h_1-j\omega_{11})t-j(\varphi_1+\alpha_1)} + \\ &\quad \frac{1}{2} k_2 x_{b1} e^{(-h_2+j\omega_{12})t+j(\varphi_2+\alpha_2)} + \frac{1}{2} k_2 x_{b1} e^{(-h_2-j\omega_{12})t-j(\varphi_2+\alpha_2)}; \end{aligned} \quad (11)$$

Для зручності запису та аналізу (11) використовуємо відому формулу Ейлера[4]

$$\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}; \sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}, \quad (12)$$

Тоді із урахуванням (12) залежність (11) матиме вигляд:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{a1} e^{-h_1 t} \cos(\omega_{11} t + \varphi_1) + x_{a1} e^{-h_2 t} \cos(\omega_{12} t + \varphi_2); \\ x_2 &= k_1 x_{a1} e^{-h_1 t} \cos(\omega_{11} t + \varphi_1 + \alpha_1) + k_2 x_{a1} e^{-h_2 t} \cos(\omega_{12} t + \varphi_2 + \alpha_2); \end{aligned} \quad (13)$$

У виразу (13) величини $h_1, h_2, \omega_{11}, \omega_{12}, k_1, k_2, \alpha_1, \alpha_2$ визначаються параметри системи (5) $[m_1; m_2; b_1; b_2; c_1; c_2]$, а величини $x_{a1}, x_{b1}, \varphi_1$ і φ_2 - початковими умовами $[x_1(0) = x_{10}; x_1(0) = x_{10}; x_2(0) = x_{20}; x_2(0) = x_{20}]$. Підставивши початкові умови в рівняння (13), отримуємо

$$\left. \begin{aligned} x_{10} &= x_{a1} \cos \varphi_1 + x_{b1} \cos \varphi_2; \\ x_{20} &= k_1 x_{a1} \cos(\varphi_1 + \alpha_1) + k_2 x_{b1} \cos(\varphi_2 + \alpha_2); \\ -x_{10} &= h_1 x_{a1} \cos \varphi_1 + \omega_{11} x_{a1} \sin \varphi_1 + h_2 \cos \varphi_2 + \omega_{12} x_{b1} \sin \varphi_2; \\ -x_{20} &= k_1 h_1 x_{a1} \cos(\varphi_1 + \alpha_1) + k_1 \omega_{11} x_{a1} \sin(\varphi_1 + \alpha_1) + \\ &+ k_2 h_2 x_{b1} \cos(\varphi_2 + \alpha_2) + k_1 \omega_{12} x_{b1} \sin(\varphi_2 + \alpha_2), \end{aligned} \right\}$$

або

$$\begin{aligned} x_{10} &= x_{a1} \cos \varphi_1 + x_{b1} \cos \varphi_2; \\ x_{20} &= k_1 x_{a1} \cos(\varphi_1 + \alpha_1) + k_2 x_{b1} \cos(\varphi_2 + \alpha_2); \\ -x_{10} &= k_{oh1} k_1 x_{a1} \sin(\varphi_1 + \beta_1) + k_{oh2} x_{b1} \sin(\varphi_2 + \beta_2); \\ -x_{20} &= k_{oh1} k_1 x_{a1} \sin(\varphi_1 + \alpha_1 + \beta_1) + k_{oh2} x_{b1} \sin(\varphi_2 + \alpha_2 + \beta_2), \end{aligned} \quad (14)$$

де

$$\begin{aligned} k_{oh1} &= \sqrt{h_1^2 + \omega_{11}^2}; k_{oh2} = \sqrt{h_2^2 + \omega_{12}^2}; \\ \beta_1 &= \arctg \frac{h_1}{\omega_{11}}; \beta_2 = \arctg \frac{h_2}{\omega_{12}}. \end{aligned}$$

Для визначення невідомих $x_{a1}, x_{b1}, \varphi_1$ і φ_2 напишемо систему (14) у вигляді

$$\left. \begin{aligned} x_{10} &= x_{a1} \cos \varphi_1 + x_{b1} \cos \varphi_2; \\ x_{20} + \Delta x_{20} &= k_1 x_{a1} \cos \varphi_1 + k_2 x_{b1} \cos \varphi_2; \\ -x_{10} - \Delta x_{10} &= k_{oh1} x_{a1} \sin \varphi_1 + k_{oh2} x_{b1} \sin \varphi_2; \\ -x_{20} - \Delta x_{20} &= k_1 k_{oh1} x_{a1} \sin \varphi_1 + k_2 k_{oh2} x_{b1} \sin \varphi_2 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Для знаходження $x_{a1}, x_{b1}, \varphi_1$ і φ_2 приймаємо наступні початкові умови:

$$\begin{aligned} x_1(0) &= x_{10}; \dot{x}_1(0) = \dot{x}_{10}; \\ x_2(0) &= x_{20}; \dot{x}_2(0) = \dot{x}_{20}, \end{aligned} \quad (16)$$

Тоді із врахуванням (16) матимемо:

$$\left. \begin{aligned} x_{10} &= x_{a1} \sin \varphi_1 + x_{b1} \sin \varphi_2; \\ x_{10} &= x_{a1} \omega_{01} \cos \varphi_1 + x_{b1} \omega_{02} \cos \varphi_2; \\ x_{20} &= k_1 x_{a1} \sin \varphi_1 + k_2 x_{b1} \sin \varphi_2; \\ x_{20} &= k_1 \omega_{01} x_{a1} \cos \varphi_1 + k_2 \omega_{02} x_{b1} \cos \varphi_2. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Для пошуку амплітуд x_{a1} і x_{b1} та фазових кутів φ_1 і φ_2 здійснимо незнані перетворення шляхом множення першого і другого рівняння системи (17) на коефіцієнт k_1 . Далі

вирахуємо із отриманих рівнянь відповідно третє і четверте рівняння цієї системи. А потім таку ж процедуру проведемо із використанням коефіцієнта k_2 . Таке рішення надає можливість отримати залежності у вигляді, зручному для пошуку фазових кутів φ_1 і φ_2 та амплітуд коливань x_{a1} і x_{b1} мас m_1 і m_2 :

$$\left. \begin{aligned} k_1 x_{10} - x_{20} &= (k_1 - k_2) x_{b1} \sin \varphi_2; \\ k_1 x_{10} - x_{20} &= \omega_{02} (k_1 - k_2) x_{b1} \cos \varphi_2; \\ k_2 x_{10} - x_{20} &= (k_2 - k_1) x_{a1} \sin \varphi_1; \\ k_2 x_{10} - x_{20} &= \omega_{01} (k_2 - k_1) x_{a1} \cos \varphi_1. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Форма запису (18) надає можливість записати вирази відносно фазових кутів φ_1 і φ_2 :

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \arctg \frac{\omega_{01} (k_2 x_{10} - x_{20})}{k_2 \dot{x}_{10} - \dot{x}_{20}}; \\ \varphi_2 &= \arctg \frac{\omega_{02} (k_1 x_{10} - x_{20})}{k_1 \dot{x}_{10} - \dot{x}_{20}}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

В остаточному вигляді із врахуванням тригонометричних формул для $\sin \varphi$ та $\cos \varphi$ отримаємо наступні вирази:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \arctg \frac{x_{20} + \Delta x_{20} - k_2 (x_{10} + \Delta x_{10})}{k_{oh1} (k_1 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})}; \\ \varphi_2 &= \arctg \frac{x_{20} + \Delta x_{20} - k_1 (x_{10} + \Delta x_{10})}{k_{oh2} (k_1 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})}; \\ \sin \varphi_1 &= \frac{x_{20} + \Delta x_{20} - k_2 (x_{10} + \Delta x_{10})}{\sqrt{(x_{20} + \Delta x_{20} - k_2 (x_{10} + \Delta x_{10}))^2 + k_{oh2}^2 (k_1 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})^2}}; \\ \sin \varphi_2 &= \frac{x_{20} + \Delta x_{20} - k_1 (x_{10} + \Delta x_{10})}{\sqrt{(x_{20} + \Delta x_{20} - k_1 (x_{10} + \Delta x_{10}))^2 + k_{oh1}^2 (k_2 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})^2}}; \\ \cos \varphi_1 &= \frac{k_{oh2} (k_1 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})}{\sqrt{(x_{20} + \Delta x_{20} - k_2 (x_{10} + \Delta x_{10}))^2 + k_{oh2}^2 (k_1 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})^2}}; \\ \cos \varphi_2 &= \frac{k_{oh1} (k_2 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})}{\sqrt{(x_{20} + \Delta x_{20} - k_1 (x_{10} + \Delta x_{10}))^2 + k_{oh1}^2 (k_2 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})^2}}. \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Підставивши вираз (21) в систему (15), знаходимо

$$\left. \begin{aligned} x_{a1} &= \frac{1}{k_{oh1} (k_2 - k_1)} \sqrt{(x_{20} + \Delta x_{20} - k_2 (x_{10} + \Delta x_{10}))^2 + k_{oh2}^2 (k_1 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})^2}; \\ x_{b1} &= \frac{1}{k_{oh2} (k_1 - k_2)} \sqrt{(x_{20} + \Delta x_{20} - k_1 (x_{10} + \Delta x_{10}))^2 + k_{oh1}^2 (k_2 x_{10} - x_{20} - \Delta x_{20})^2}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Із рівнянь (14) та (15) визначаємо

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{20} &= k_1 x_{a1} |\cos \varphi_1 - \cos(\varphi_1 + \alpha_1)| + k_2 x_{b1} |\cos \varphi_2 - \cos(\varphi_2 + \alpha_2)|; \\ -\Delta x_{10} &= k_{oh1} x_{a1} [\sin \varphi_1 - \sin(\varphi_1 + \beta_1)] + k_{oh} x_{b1} [\sin \varphi_2 - \sin(\varphi_2 + \beta_2)]; \\ -\Delta x_{20} &= k_1 k_{oh1} x_{a1} [\sin \varphi_2 - \sin(\varphi_1 + \alpha_1 + \beta_1)] + k_2 k_{oh2} x_{b1} [\sin \varphi_2 - \alpha_2 + \beta_2]. \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

В результаті перетворення системи (23) приймає вид

$$\left. \begin{aligned} a_{z11} z_1 + a_{z12} z_2 + a_{z13} z_3 &= b_{z1}; \\ a_{z21} z_1 + a_{z22} z_2 + a_{z23} z_3 &= b_{z2}; \\ a_{z31} z_1 + a_{z32} z_2 + a_{z33} z_3 &= b_{z3}; \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

де

$$\begin{aligned} z_1 &= \Delta x_{20}; \quad z_2 = \Delta x_{10}; \quad z_3 = \Delta x_{20}; \quad a_{z11} = 1 + \frac{k_{k1}}{k_{oh1}} \alpha_{11} k_{oh2} + \frac{k_{k2}}{k_{oh2}} \alpha_{21} k_{oh1}; \\ a_{z12} &= \frac{k_{k1}}{k_{oh1}} k_2 \sin \alpha_1 + \frac{k_{k2}}{k_{oh2}} k_1 \sin \alpha_2; \quad a_{z13} = -\frac{k_{k1}}{k_{oh1}} \sin \alpha_1 - \frac{k_{k2}}{k_{oh2}} \sin \alpha_2; \\ a_{z21} &= -\frac{k_{k1}}{k_1} k_{oh2} \sin \beta_1 - \frac{k_{k2}}{k_2} k_{oh1} \sin \beta_2; \quad a_{z22} = -1 + \frac{k_{k1}}{k_1} \beta_{11} k_2 + \frac{k_{k2}}{k_2} \beta_{21} k_1; \\ a_{z23} &= -\frac{k_{k1}}{k_1} \beta_{11} + \frac{k_{k2}}{k_2} \beta_{21}; \quad a_{z31} = -k_{k1} k_{oh2} \sin(\alpha_1 + \beta_1) - k_{k2} k_{oh1} \sin(\alpha_2 + \beta_2); \\ a_{z32} &= k_{k1} \alpha_{\beta 1} k_2 + k_{k2} \alpha_{\beta 2} k_1; \quad a_{z33} = -1 - k_{k1} \alpha_{\beta 1} - k_{k2} \alpha_{\beta 2}; \\ b_{z1} &= \frac{k_{k1}}{k_{oh1}} [k_{oh2} \alpha_{11} (k_1 x_{10} - x_{20}) + \sin \alpha_1 (x_{20} - k_2 x_{10})] + \\ &+ \frac{k_{k2}}{k_{oh2}} [k_{oh1} \alpha_{21} (k_2 x_{10} - x_{20}) + \sin \alpha_2 (x_{20} - k_1 x_{10})]; \\ b_{z2} &= \frac{k_{k1}}{k_1} [\beta_{11} (x_{20} - k_2 x_{10}) - k_{oh2} \sin \beta_1 (k_1 x_{10} - x_{20})] + \\ &+ \frac{k_{k2}}{k_2} [\beta_{21} (x_{20} - k_1 x_{10}) - k_{oh1} \sin \beta_2 (k_2 x_{10} - x_{20})]; \\ b_{z3} &= k_{k1} [\alpha_{\beta 1} (x_{20} - k_2 x_{10}) - k_{oh2} \sin(\alpha_1 + \beta_1) (k_1 x_{10} - x_{20})] + \\ &+ k_{k2} [\alpha_{\beta 2} (x_{20} - k_1 x_{10}) - k_{oh1} \sin(\alpha_2 + \beta_2) (k_2 x_{10} - x_{20})]; \\ k_{k1} &= \frac{k_1}{k_2 - k_1}; \quad k_{k2} = \frac{k_2}{k_1 - k_2}; \quad \alpha_{11} = 1 - \cos \alpha_1; \\ \alpha_{21} &= 1 - \cos \alpha_2; \quad \beta_{11} = 1 - \cos \beta_1; \quad \beta_{21} = 1 - \cos \beta_2; \\ \alpha_{\beta 1} &= 1 - \cos(\alpha_1 + \beta_1); \quad \alpha_{\beta 2} = 1 - \cos(\alpha_2 + \beta_2). \end{aligned}$$

де

Рішення системи рівнянь (24)

$$z_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta}; \quad z_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta}; \quad z_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta}, \quad (25)$$

де

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{z11} & a_{z12} & a_{z13} \\ a_{z21} & a_{z22} & a_{z23} \\ a_{z31} & a_{z32} & a_{z33} \end{vmatrix};$$

Для отримання виразу енергії формули переміщень x_1 , x_2 , (2.28). та швидкостей \dot{x}_1 , \dot{x}_2 , як похідних від переміщень x_1 , x_2 , підставляємо у рівняння енергій (26):

$$E = T + \Pi = \frac{1}{2} \left[m_1 \dot{x}_1^2 + m_2 \dot{x}_2^2 + c_1 x_1^2 + c_2 (x_2 - x_1)^2 \right]. \quad (26)$$

У результаті перетворень воно має вигляд

$$\begin{aligned} E_t = & \frac{1}{2} x_{a1}^2 e^{-2h_1 t} \{ c_1 \cos^2(\omega_1 t + \varphi_1) + c_2 [\cos(\omega_1 t + \varphi_1) - k_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \alpha_1)]^2 + m_1 [h_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \omega_{11} \sin(\omega_1 t + \varphi_1)]^2 + \\ & + m_2 k_1^2 [h_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \alpha_1) + \omega_{11} \sin(\omega_1 t + \varphi_1 + \alpha_1)]^2 \} + x_{a1} x_{b1} e^{-2(h_1 + h_2) t} \{ c_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + \\ & + c_2 [\cos(\omega_2 t + \varphi_2) - k_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \alpha_2)] \times [\cos(\omega_1 t + \varphi_1) - k_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \alpha_1)] + \\ & + m_1 [h_1 \cos(\omega_2 t + \varphi_1) + \omega_{11} \sin(\omega_2 t + \varphi_1)] \times [h_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + \omega_{12} \sin(\omega_2 t + \varphi_2)] + \\ & + m_2 k_1 k_2 [h_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1 + \alpha_1) + \omega_{11} \sin(\omega_1 t + \varphi_1 + \alpha_1)] \times [h_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \alpha_2) + \omega_{12} \sin(\omega_2 t + \varphi_2 + \alpha_2)] \} + \\ & + \frac{1}{2} x_{b1}^2 e^{-2h_2 t} \{ c_1 \cos^2(\omega_2 t + \varphi_2) + c_2 [\cos(\omega_2 t + \varphi_2) - k_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \alpha_2)]^2 + \\ & + m_1 [h_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + \omega_{12} \sin(\omega_2 t + \varphi_2 + \alpha_2)]^2 + m_2 k_2^2 [h_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2 + \alpha_2) + \omega_{12} \sin(\omega_2 t + \varphi_2 + \alpha_2)]^2 \}. \end{aligned} \quad (27)$$

В початковий момент $t=0$ енергія системи описується виразом

$$\begin{aligned} E_t = & \frac{1}{2} x_{a1}^2 \{ c_1 \cos^2 \varphi_1 + c_2 [\cos \varphi_1 - k_1 c_2 \cos(\varphi_1 + \alpha_1)]^2 + m_1 [h_1 \cos \varphi_1 + \omega_{11} \sin \varphi_1]^2 + \\ & + m_2 k_1^2 [h_1 \cos(\varphi_1 + \alpha_1) + \omega_{11} \sin(\varphi_1 + \alpha_1)]^2 \} + x_{a1} x_{b1} \{ c_1 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 + \\ & + c_2 [\cos \varphi_2 - k_2 \cos(\varphi_2 + \alpha_2)] \times [\cos \varphi_1 - k_1 \cos(\varphi_1 + \alpha_1)] + \\ & + m_1 [h_1 \cos \varphi_1 + \omega_{11} \sin \varphi_1] \times [h_2 \cos \varphi_2 + \omega_{12} \sin \varphi_2] + \\ & + m_2 k_1 k_2 [h_1 \cos(\varphi_1 + \alpha_1) + \omega_{11} \sin(\varphi_1 + \alpha_1)] \times [h_2 \cos(\varphi_2 + \alpha_2) + \omega_{12} \sin(\varphi_2 + \alpha_2)] \} + \\ & + \frac{1}{2} x_{b1}^2 \{ c_1 \cos^2 \varphi_2 + c_2 [\cos \varphi_2 - k_2 \cos(\varphi_2 + \alpha_2)]^2 + m_1 [h_2 \cos \varphi_2 + \omega_{12} \sin(\varphi_2 + \alpha_2)]^2 + \\ & + m_2 k_2^2 [h_2 \cos(\varphi_2 + \alpha_2) + \omega_{12} \sin(\varphi_2 + \alpha_2)]^2 \}. \end{aligned} \quad (28)$$

Енергія, розсіяна за час t , складає $\Delta E = E_0 - E_t$.

Оскільки частоти ω_{11} і ω_{12} в загальному випадку різні то і не може бути загального періоду коливань. Тому розсіяння енергії визначається за якийсь проміжок часу $\Delta t_i = t_1 - t_0$, $i = 1, 2, \dots, n$.

$$\left. \begin{aligned} x_1 = x_{10} = 0; & \quad x_2 = x_{20} = 0; \\ x_1 = x_{10} \neq 0; & \quad x_2 = x_{20} \neq 0. \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

В цьому випадку виразу (26) приймає вигляд

$$E_0 = T_{\max} = \frac{1}{2}(m_1 x_{10}^2 + m_2 x_{20}^2), \quad (30)$$

тобто вся початкова енергія виражена у формі кінетичної, яка в дисипативній системі в момент $t=0$ максимальна. Потенціальна енергія в цей момент дорівнює нулю.

Вираз (29) дає можливість розглянути розсіяння енергії в системі за інтервали часу Δt_i , визначаються моментами t_i в яких потенціальна енергія системи рівна нулю: $x_{1i} = x_{2i} = 0$. Тоді енергія системи E_i рівна кінетичній $T_{i\max}$ і виражається залежністю

$$E_i = T_{i\max} = \frac{1}{2}(m_1 x_{1t}^2 + m_2 x_{2t}^2). \quad (31)$$

Розсіяння енергії за час Δt_i визначається виразом

$$\Delta E_i = \frac{1}{2}[m_1(x_{10}^2 - x_{1i}^2) + m_2(x_{20}^2 - x_{2i}^2)]. \quad (32)$$

де

$$\begin{aligned} x_1 &= x_1(t_i) = -x_{a1}\omega_{1h}e^{-h_1 t_i} \sin(\omega_{11}t_i + \varphi_1 + \gamma_1) - x_{b1}\omega_{2h}e^{-h_2 t_i} \sin(\omega_{12}t_i + \varphi_2 + \gamma_2); \\ x_{2i} &= x_2(t_i) = -k_i x_{a1}\omega_{1h}e^{-h_1 t_i} \sin(\omega_{11}t_i + \varphi_1 + \alpha_1 + \gamma_1) - k_2 x_{b1}\omega_{2h}e^{-h_2 t_i} \sin(\omega_{11}t_i + \varphi_2 + \alpha_2 + \gamma_2); \\ \omega_{1h} &= \sqrt{h_1^2 + \omega_{11}^2}; \quad \omega_{2h} = \sqrt{h_2^2 + \omega_{12}^2}; \\ \gamma_1 &= \arctg \frac{\omega_{11}}{h_1}; \quad \gamma_2 = \arctg \frac{\omega_{12}}{h_2}. \end{aligned}$$

Тепер визначимо рішення вимушених коливань вібраційної системи (4) для сталого режиму:

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 \cos \omega t + A_2 \sin \omega t; \\ x_2 &= A_3 \cos \omega t + A_4 \sin \omega t. \end{aligned} \quad (33)$$

Константи $A_1 \dots A_4$ визначаються підстановкою рівнянь (33) в (4) В результаті отримуємо

$$A_{i1} = \frac{\Delta_{cl}}{\Delta}, \quad i = \bar{1}, \bar{4}, \quad (34)$$

де

$$\Delta = \begin{vmatrix} c_1 + c_2 - m_1 \omega^2 & (b_1 + b_2) \omega & -c_2 & b_2 \omega \\ -\omega(b_1 + b_2) & c_1 + c_2 - m_1 \omega^2 & b_2 \omega & -c_2 \\ -c_2 & -b_2 \omega & c_2 - m_2 \omega^2 & \omega b_2 \\ \omega b_2 & -c_2 & -\omega b_2 & c_2 - m_2 \omega^2 \end{vmatrix} \quad (35)$$

Δ - визначники, отримані з (35) шляхом заміни i -го стовпця на стовець виду $(F_{0i}, 0, 0)$.

Рішення (33) можна записати у вигляді

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{a1} \cos(\omega t - \varphi_1) \\ x_2 &= x_{a2} \cos(\omega t - \varphi_2) \end{aligned} \quad (36)$$

де

$$x_{01} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}; \quad x_{02} = \sqrt{A_3^2 + A_4^2}$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{A_2}{A_1}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{A_4}{A_3}$$

Робота, виконана зовнішньою гармонічною силою, дорівнює роботі, виконаній на першій масі:

$$A_F = \pi F_{1a} x_a \sin \varphi_1. \quad (37)$$

На резонансних частотах ω_{01} і ω_{02}

$$|\sin \varphi_{1\omega 01}| = |\sin \varphi_{1\omega 02}| = 1.$$

Енергія, що розсіюється в системі, становить

$$\Delta E = \pi \omega \left[b_1 x_{a1}^2 + b_2 (x_{a2} - x_{a1})^2 \right]. \quad (38)$$

В режимі резонансу вирази (37) і (38) будуть рівними між собою. Із цієї рівності отримаємо співвідношення:

$$x_{a1} = \frac{F_{a1}}{b_1 \omega_p + b_2 \omega_p \left(\frac{x_{a2}}{x_{a1}} - 1 \right)^2}, \quad (40)$$

яка буде максимальною при $x_{a1} = x_{a2}$, в разі нескінченно великих значень коефіцієнта пружності c_2 або демпфування b_2 . Тоді рівняння (40) набуває вигляду:

$$x_{a1p} = F_{a1} / b_1 \omega_p, \quad (41)$$

6. Обговорення результатів досліджень. Розгляд вільних коливань дав можливість здійснити аналіз співвідношення кінетичної і потенційної енергії в різних частинах руху системи. Амплітуди коливань маси m_1 X_{01} і маси m_2 X_{02} будуть максимальними в резонансному режимі системи. Резонансні частоти мають вигляд коренів характеристичного рівняння $\Delta = 0$. На резонансах максимальні амплітуди коливань будуть на рівні $b_1 = b_2 = 0$. При цьому амплітуди коливань нескінченні. При $b_2 = \infty$ амплітуда коливань визначається тільки величиною b_1 , а в разі $b_2 = \infty$, $b_1 = 0$ вона також нескінченна. Це пов'язано з тим, що при $b_2 = \infty$ Система стає як би одномасною з масою $M = m_1 + m_2$. Робота дисипативної сили в обох випадках (у разі $b_1 = 0$) не здійснюється, так як в першому випадку дисипативна сила дорівнює нулю, а в другому немає відносного зміщення мас. Звідси випливає, що при значенні $0 < b_2 < \infty$ робота дисипативної сили буде максимальною, а резонансна амплітуда коливань другої маси приймає мінімальне значення. Відношення амплітуд масових коливань у резонансних режимах системи визначені на основі розглянутих енергетичних взаємозв'язків.

7. Висновки.

1. Для двомісної системи з малим розсіюванням в разі дії сили на одну з мас (наприклад, m_1) при заданій амплітуді коливань цієї маси відношення амплітуд коливань в резонансному режимі визначається тільки параметрами другої маси і співвідношенням між масами та коефіцієнта b_2 .

2. При резонуванні на частоті, близькій до власної частоти маси m_1 , на яку діє сила F_{01} , різниця між силою інерції, що діє на другу масу m_2 , і силою пружності не дорівнює нулю.

Тому вплив дисипації незначний. У разі резонансу на частоті, викликаній другою масою m_2 , роль сил розсіювання зростає.

3. Розсіювання енергії, що пов'язане з масою m_1 , робить істотний вплив на частоту першого резонансу ω_{01} , але на частоті ω_{02} його вплив не значний.

4. При стаціонарних коливаннях середня енергія, що циркулює в системі, зберігається.

5. Кожен період джерело поповнює витрати енергії для стаціонарного стану розсіювання енергії має дорівнювати роботі, виконаній за цей період зовнішньою силою F_{01} , прикладеною до системи.

6. Отримані результати використані при розробки алгоритмів та методики розрахунку параметрів вібраційної установки із енергоощадним режимом роботи.

Список використаних джерел:

1. Nesterenko M.P. and others. Vibration platform for forming large-sized reinforced concrete products // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2019, No 5. – P. 284 – 288.
2. Орищенко С.В. Теоретичні дослідження та визначення основних етапів руху вібраційного грохота. *Техніка будівництва*. – 2010. – № 24. – С. 44–47.
3. Ручинський М.М., Свиридчук Д.Я. Дослідження коливань вібраційного бетонозмішувача з урахуванням впливу перемішувача матеріалу. *Техніка будівництва. Науково-технічний журнал*. Київ: КНУБА, 2013. № 31. с. 35–42
4. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем (2-е видання). К.: Видавничий дім «Слово», 2010. – 440с.
5. 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.
6. Андрій Запривода. Ефективність процесу ущільнення будівельних сумішей для улаштування доріг. Тези V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології», КНУБА, 2024, - С.

УДК 624.1 : 303.732

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0305>**Геннадій Гайко,**

доктор технічних наук,
професор кафедри геоінженерії,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4263-5958>
E-mail: h.haiko@kpi.ua

Іван Назаренко,

доктор технічних наук,
професор кафедри машини і обладнання технологічних процесів,
Київський національний університет будівництва та архітектури
проспект Повітряних Сил, 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1888-3687>
E-mail: ii_nazar@ukr.net

Ілля Савченко,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри математичних методів системного аналізу,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0921-5425>
E-mail: savil.ua@gmail.com

КОМБІНОВАНА МОДЕЛЬ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЩОДО ПРІОРИТЕТІВ РОЗВИТКУ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ТУНЕЛІВ КИЄВА

АНОТАЦІЯ. Проведено аналіз можливостей зниження кліматичних (екологічних), техногенних та безпекових ризиків у транспортній інфраструктурі міста Києва в разі будівництва системи автомобільних тунелів, передбачених у Генеральному плані м. Києва. При цьому ключові структурно-функціональні фактори впливу включали: тип забудови в районі потенційного тунелю, фактор середмістя, щільність населення, щоденний маятниковий рух, щільність магістральної мережі, середню швидкість руху в години пік, наземну зв'язаність кінців (порталів) тунелів автошляхами, пропускну здатність автомобільних доріг, ступінь критичності об'єкту транспортної інфраструктури, вразливість внаслідок воєнних атак або терактів. У дослідженні був застосований модифікований метод морфологічного аналізу, який враховував групи кліматичних (екологічних) та техногенних ризиків, а також воєнних (терористичних) загроз. З урахуванням цього побудовано модель підтримки прийняття рішень щодо визначення пріоритетності та ранжування (доцільної черговості) будівництва тунелів. Крім того, було запропоновано комбінування процесу морфологічного аналізу з методом аналізу ієрархій, що забезпечило альтернативні точки зору з дещо іншим рейтингом тунелів порівняно з базовою моделлю у відповідності до заданої пріоритетності (ваги) того чи іншого ризику при прийнятті рішень. Цей підхід може бути корисним для розвитку транспортної політики з метою наближення до кліматичної нейтральності великих міст, а також для максимального захисту міської транспортної інфраструктури в умовах воєнних загроз. Використовуючи отримані в роботі системні інструменти та комбіновані моделі, міська спільнота може стати безпечнішою та стійкішою, керуючи транспортною політикою на засадах системного підходу та багатокритеріального аналізу факторів впливу.

Ключові слова: міський сталий розвиток, кліматична нейтральність, планування транспортної інфраструктури, автомобільні тунелі, системний аналіз.

COMBINED DECISION SUPPORT MODEL FOR DEVELOPMENT PRIORITIES OF THE KYIV CAR TUNNEL NETWORK

ABSTRACT. An analysis is conducted for the opportunities to reduce climate (ecological), technogenic and safety risks in the Kyiv transport infrastructure in case of construction of the car tunnel system envisioned in the Kyiv city General plan. The involved structural and functional factors included district type in the potential tunnel's area, downtown factor, population density, daily pendular movement, arterial network density, average traffic speed at peak hours, surface connectivity of the exits (portals) of the tunnel by automobile roads, surface road throughput, criticalness of the transport infrastructure object, and vulnerability in case of military attacks or terrorist acts. The modified morphological analysis method was applied in the research, that considered groups of climate (ecological) and technogenic risks, and also the military (terrorist) threats. This became the basis for construction of the decision support model regarding the evaluation of priorities and rankings (rational order) of tunnel construction. Additionally, a combination of morphological analysis with analytical hierarchy process was proposed that provided alternative viewpoints with a different ranking compared to the basic model, depending on the given priorities (weights) of risk factors during decision making. This approach may be useful for development of the transport policy with the goal of approaching climate neutrality for big cities, as well as maximum protection of urban transport infrastructure in conditions of wartime threats. Using the developed system tools and combined models, the urban society can become safer and more resilient, managing transport policies on the basis of the system approach, and multi-criteria analysis of impact factors.

Keywords: sustainable urban development, climate neutrality, transport infrastructure planning, car tunnels, system analysis.

1. Постановка проблеми.

Регулювання міського розвитку з метою підвищення кліматичних (екологічних) стандартів, зручності та безпеки життя в постійно зростаючих мегаполісах є однією з найактуальніших, але недостатньо вивчених комплексних глобальних проблем [1, 2]. Однією з особливостей розвитку сучасного мегаполісу є значне розширення та ускладнення міської інфраструктури (зокрема, її транспортної мережі), що призводить до зростання ризиків та загроз для її ефективного та безпечного функціонування. Світові концепти сталого розвитку великих міст приділяють значну увагу здатності підземного простору взяти на себе функції найбільш вразливих і ризикованих наземних об'єктів і комунікацій, забезпечуючи таким чином мінімізацію кліматичних (екологічних) і техногенних ризиків [3–5]. Останнім часом поряд із зазначеними традиційними групами ризиків міської транспортної інфраструктури актуалізувалася додаткова група ризиків, пов'язана з військовими та терористичними загрозами. Після 24 лютого 2022 року (початок російської агресії проти України) міський підземний простір активно розглядається, а в Україні використовується на практиці, як зона захисту цивільного населення та критичної інфраструктури від потенційних ударів з повітря. Виникає потреба розвитку міського підземного простору як способу забезпечення надійних і безпечних зон урбаністичного середовища та комунікацій в умовах можливої конвенційної війни (використання підземних споруд за подвійним призначенням), що формує додаткові стимули збільшення масштабів підземного будівництва.

Згідно даних Генерального плану м. Києва [6] територія міста складає 826,4 км². Чисельність постійного населення – 2,91 млн. осіб (фактично – понад 3,3 млн.). Основа архітектурно-планувальної композиції міста зумовлена наявністю великої ріки (Дніпро), потужним піднесеним прибережним рельєфом правого берега з характерними крупними по членуванню територіями, що визначались ерозійними процесами і локальною гідрографією. В економічному комплексі міста зайнято 1,73 млн. осіб, при цьому на лівобережжі Дніпра проживає 36% мешканців міста, а розміщується лише 15% робочих місць, на правобережжі – 64% мешканців і 85% робочих місць, що сприяє сталій тенденції маятникового руху працівників через Дніпро, що спричиняє наднормативне навантаження на мости і основні магістралі (подібний процес спостерігається також при маятниковому русі працівників із правобережних передмість Києва до ядра міста). Середня щільність населення на території міста складала 3,4 тис. осіб на кв. км. Кількість туристів, що обслуговувались у місті – 2,1 млн. осіб на рік (2019).

Магістральна вулична мережа складає 760 км, середня щільність мережі – 2,2 км/км², кількість мостових автодорожніх переходів через Дніпро – 5, загальний рівень автомобілізації – 370 авто на 1 тис. мешканців. Протяжність Київського метрополітену складає 67,7 км, кість станцій – 52 (Генеральним планом передбачається збільшення протяжності до 99,8 км та кількості станцій до 81). Річний обсяг пасажирських перевезень метрополітену – 496,1 млн. пасажирів. У місті також функціонує міська залізниця (6,9 млн.), швидкісний та звичайний трамвай (107,1 млн.), тролейбус (137,1 млн.) і автобус (416 млн.).

Для збільшення загальної мобільності автотранспорту, ефективного розвитку автодорожньої мережі, поліпшення зв'язків між окремими районами (зокрема лівим і правим берегами Дніпра) Генеральним планом м. Києва передбачалося будівництво системи з 8 автомобільних тунелів (рис. 1), проте фахові й суспільні дискусії щодо доцільності повного обсягу їх будівництва продовжуються, що знайшло певні відображення в більш стриманому підході до перспектив тунелебудування при останньому перегляді Генерального плану [6].

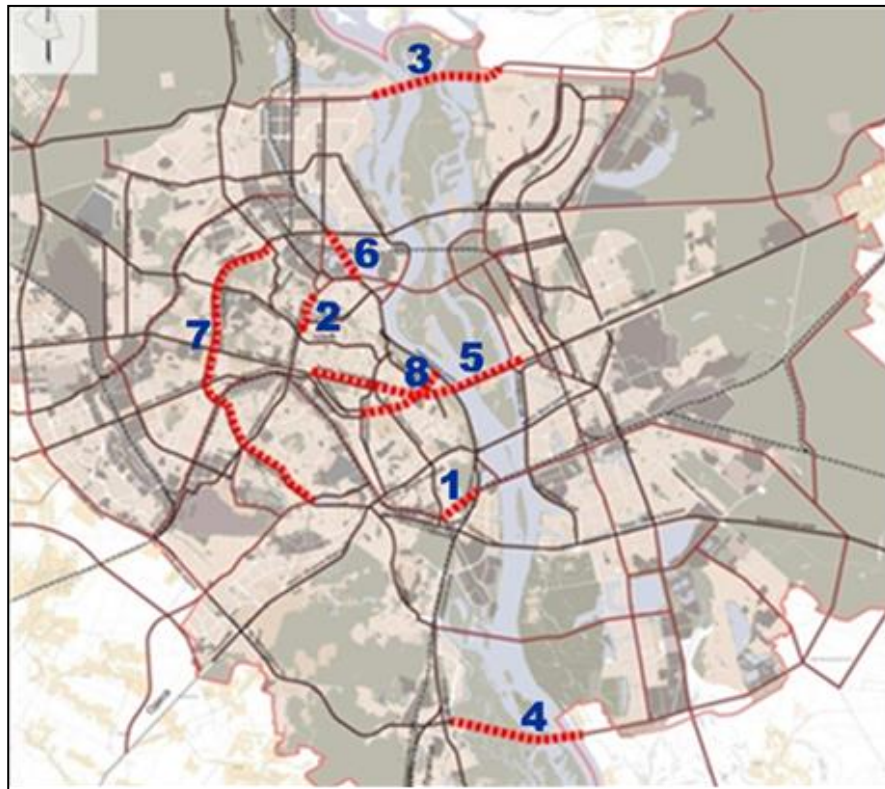


Рис. 1. Схема запланованих ділянок тунелів відповідно до Генерального плану м. Києва
Fig. 1. Scheme of the planned tunnel tracks according to the Kyiv city General plan

Зазначені на рис. 1 тунелі можна поділити на 3 групи: 1) сполучення лівого та правого берегів Києва підземними автомагістралями, тунелі під Дніпром (3, 4, 5); забезпечення найкоротшого та найзручнішого маршруту руху з урахуванням рельєфу місцевості, тунелі під пагорбами (1, 2, 5, 6, 8); розподіл транспорту на перевантажених трасах (дублювання автомагістралей), тунелі під протяжними автомагістралями (5, 7).

Повоєнне відновлення столиці України вже зараз потребує аналізу та перегляду довоєнних планів розвитку міста, зокрема великих інфраструктурних проектів тунельного будівництва, що зумовлено зокрема необхідністю найбільш ефективного розвитку інвестиційної політики для швидкого наближення м. Києва до стандартів ЄС щодо безпеки, кліматичної (екологічної) нейтральності, транспортного комфорту тощо. Враховуючи можливості повоєнної підтримки великих інфраструктурних проектів в Україні з боку європейських партнерів, можна передбачити початок розвитку мережі автомобільних тунелів Києва вже в короткостроковій

перспективі, що потребує прийняття рішень щодо пріоритетності їх будівництва та уточнення трас.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання будівництва мережі автомобільних тунелів Києва, зокрема – тунелів під Дніпром [7, 8], має широке медійне, фахове і суспільне обговорення (наприклад – в Академії будівництва України, в Департаменті транспортної інфраструктури КМДА тощо) із загальним висновком щодо необхідності початку проектування та будівництва перших тунелів, актуальність яких ще більше зросла в умовах воєнних загроз. Проблему прийняття рішень при плануванні транспортної інфраструктури великих міст (зокрема – розвитку системи автомобільних тунелів м. Києва) можна віднести до слабкоструктурованих проблем, в яких цілі, структура та умови відомі лише частково і характеризуються неточністю, неповнотою, невизначеністю, нечіткістю даних, що описують об'єкт і фактори впливу, що потребує цілісного інтегрованого підходу та наукового системного інструментарію планування [3, 9]. Як показує низка досліджень проблем урбаністичного простору [10, 11], такою системною методологією підтримки процесу планування може бути морфологічний аналіз, зокрема його модифікований метод, розроблений за участю авторів для планування підземної урбаністики [3, 12–14]. Для більш ефективного управління процесом прийняття рішень доцільно ранжувати важливість (значимість) різноманітних ризиків (які розглядаються в морфологічній моделі) в залежності від актуальності проблем міського розвитку та філософії міста [15, 16]. Для цього авторами було використано можливості методу аналізу ієрархій [17, 18] і його модифікації [19, 20].

3. Мета роботи. Розробити набір системних інструментів щодо синтезу морфологічної моделі, яка враховує групу структурних та функціональних факторів для формалізації процесу прийняття планувальних рішень щодо пріоритетності будівництва автомобільних тунелів м. Києва, з модифікованим методом аналізу ієрархій, який дозволить врахувати важливість (вагу) різноманітних ризиків під час прийняття рішень. Розроблена комбінована модель має на меті охопити в комплексі не лише існуючий стан міського простору, але й тенденції подальшого розвитку, включаючи потребу у більшій стійкості у воєнний час і сприяттві кліматичній нейтральності міського транспорту.

4. Матеріали та методи. Проблема розвитку мережі автомобільних тунелів Києва є комплексною системною задачею, яка для всебічного і ґрунтовного дослідження вимагає застосування системного підходу [9]. Процес системного аналізу може включати ряд методів якісного аналізу, таких як метод Делфі, метод перехресного впливу, метод морфологічного аналізу, метод аналізу ієрархій тощо, що дозволяють детально вивчати складні об'єкти і системи з урахуванням невизначеностей, багатофакторних ризиків, змін із часом, що не можуть бути передбачені на основі минулих трендів. Для даного дослідження було вирішено застосувати комбінований підхід на основі модифікованого методу морфологічного аналізу і методу аналізу ієрархій.

Метод морфологічного аналізу [11, 21] і його модифікація [14] – це потужний інструмент дослідження об'єктів, яким притаманна суттєва невизначеність, з поглибленим аналізом взаємозв'язків між компонентами такого об'єкта та кількісною оцінкою факторів впливу та критеріїв ризику. Цей метод успішно був застосований для багатьох задач підземної урбаністики [12], зокрема для оцінювання ділянок підземного будівництва [22], в тому числі комплексного (інженерно-геологічні та структурно-функціональні фактори) оцінювання ділянок під підземні паркінги [13], аналізу впливу небажаних подій на урбаністичні об'єкти [23] тощо. В основі методу лежить багатократна комбінаторика заданого об'єкта у множині різних параметрів впливу, що дає можливість дослідити велику кількість конфігурацій цього об'єкта, комбінуючи різні значення кожного з параметрів. При цьому генерується значний об'єм аналітичної інформації, яка може бути складною для сприйняття людиною, що не є аналітиком, тому результати методу зазвичай потребують додаткової адаптації і візуалізації для осіб, що приймають рішення. Для імплементації даної процедури застосовувались програмні засоби на основі SAS Studio з авторськими модулями Microsoft Visual Studio, що відповідають основним етапам модифікованого методу морфологічного аналізу.

Метод аналізу ієрархій [17, 18] і його модифікація [19, 20] орієнтовані в першу чергу на задачу підтримки прийняття рішень, з використанням складної ієрархічної структури для врахування всіх цілей і критеріїв, що впливають на загальне рішення. Цей метод також застосовувався в ряді задач, зокрема, вибору пріоритетних заходів вирішення соціальних проблем м. Києва, оцінювання сценаріїв розвитку транспортної системи м. Києва [19], оцінювання пріоритетності екологічних проєктів Одеської області [24] тощо. Метод дає змогу отримати обґрунтоване ранжування ряду об'єктів, однак при цьому потрібні експертні парні порівняння, що вносить певний суб'єктивізм у процес оцінювання, особливо у разі заангажованості експерта щодо деяких альтернатив; також при появі великої кількості альтернатив необхідна кількість експертних оцінок швидко зростає.

Комбінування цих двох методів дозволяє поєднати їх сильні сторони для отримання моделі, що може обробити велику кількість конфігурацій об'єкта і при цьому дати чіткий результат у відповідності до поставлених цілей. В даному дослідженні комбінована процедура модифікованого методу морфологічного аналізу і методу аналізу ієрархій складалась із наступних кроків:

1. Визначення структурно-функціональних факторів ділянки, запланованої під будівництво автомобільного тунелю, і факторів ризику, які будівництво тунелю може мінімізувати.
2. Побудова двоетапної моделі модифікованого методу морфологічного аналізу для довільної ділянки, що на основі аналізу структурно-функціональних факторів цієї ділянки оцінює важливість і вплив майбутнього тунелю на обрані фактори ризику.
3. Внесення інформації про конкретні ділянки і розрахунок впливів потенційних тунелів за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу.
4. Автоматичне перетворення отриманих результатів для генерування парних порівнянь, і в подальшому локальних ваг тунелів відносно факторів ризику.
5. Порівняння факторів ризику за важливістю, і розрахунок пріоритетів ділянок на основі методу аналізу ієрархій.

Для аналізу структурно-функціональних факторів був взятий перелік із одного з попередніх досліджень підземного простору м. Києва [13], розширений з урахуванням безпекових факторів. Таким чином, на першому етапі морфологічного аналізу розглядалися десять параметрів, що відповідають цим факторам:

1. Тип забудови в районі потенційного тунелю.
2. Фактор середмістя.
3. Щільність населення.
4. Маятниковий рух працівників (на роботу – з роботи).
5. Щільність магістральної мережі.
6. Середня швидкість автомобільного руху на найбільш завантажених ділянках у години «пік» в районі потенційного тунелю.
7. Наземна зв'язаність кінців (порталів) тунелю автошляхами.
8. Пропускна здатність наземних шляхів в районі потенційного тунелю.
9. Ступінь критичності об'єкту транспортної інфраструктури.
10. Стан вразливості транспортної інфраструктури.

На основі цих десяти взаємопов'язаних факторів оцінювався вплив потенційного тунелю на такі шість факторів ризику:

1. Забруднення повітря.
2. Шум і динамічні впливи.
3. Дорожні затори.
4. Дорожні аварії.
5. Протяжність маршруту сполучення.
6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів.

Ці фактори ризику лягли в основу морфологічної таблиці другого етапу. Одним із параметрів була важливість кожного фактору на конкретній ділянці; таким чином створювався

унікальний «профіль» ділянки, який визначав, що саме є критичним на даній ділянці – наприклад, для житлової забудови мінімізація забруднення повітря і шуму є більш важливою, ніж для району переважно промислової забудови. Решта параметрів стосувались безпосередньо здатності потенційного тунелю вплинути на кожен конкретний фактор ризику. Вплив оцінювався альтернативами, що відображали 4 рівні: «Не впливає», «Частково мінімізує», «Помірно мінімізує», «Суттєво мінімізує».

За допомогою людино-машинної процедури введення даних були заповнені матриця взаємозв'язків (для врахування взаємовпливів між структурно-функціональними параметрами на першому етапі методу), і матриця зв'язків (для передачі впливу значень структурно-функціональних параметрів на фактори ризику). Отримана модель дозволяє оцінити будь-які території, призначені для будівництва 8 тунелів, представлених у Генеральному плані м. Києва (див. рис. 1).

5. Результати досліджень. Після розрахунків за допомогою модифікованого методу морфологічного аналізу для кожного з тунелів були отримані ваги факторів ризику (табл. 1), і їх потенційні впливи на відповідні фактори ризику. Приклад розрахунку впливів показаний в табл. 2 для фактору «Забруднення повітря». Такі ж таблиці були отримані для всіх інших факторів.

Таблиця 1. Розраховані ваги факторів ризику для ділянок, що відповідають тунелям 1–8

Table 1. Calculated risk factor importance for sites of the tunnels 1–8

№ тунелю	Забруднення повітря	Шум і динамічні впливи	Дорожні за-тори	Дорожні аварії	Протяжність маршруту сполучення	Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів
1	0,152	0,11	0,274	0,141	0,184	0,139
2	0,062	0,032	0,379	0,036	0,331	0,16
3	0,031	0,018	0,276	0,049	0,294	0,332
4	0,02	0,008	0,315	0,049	0,317	0,291
5	0,051	0,029	0,331	0,029	0,324	0,236
6	0,044	0,02	0,439	0,037	0,3	0,161
7	0,15	0,093	0,352	0,081	0,19	0,133
8	0,081	0,054	0,331	0,05	0,303	0,182

Таблиця 2. Розраховані впливи тунелів на фактор «Забруднення повітря»

Table 2. Calculated tunnels' impacts on the factor "Air pollution"

№ тунелю	Не впливає	Частково мінімізує	Помірно мінімізує	Суттєво мінімізує
1	0,013	0,266	0,463	0,259
2	0,003	0,23	0,577	0,189
3	0,019	0,274	0,599	0,108
4	0,021	0,298	0,631	0,05
5	0,000	0,104	0,543	0,353
6	0,007	0,296	0,57	0,127
7	0,001	0,139	0,457	0,404
8	0,002	0,191	0,525	0,282

З таблиці 1 бачимо, що, наприклад, тунелі 3 і 4 мають найбільші ваги факторів «Протяжність маршруту сполучення» і «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів», оскільки ці ділянки відповідають мостовим переходам, що є критичними з точки зору поєднання кінців потенційного тунелю автошляхами, і найбільш важкими у відновленні в разі ворожих атак або терактів. Для тунелів, де є більша можливість дублювання наземними шляхами, профілі важливості факторів суттєво відрізняються.

Таблиця 2 демонструє різницю між тунелями з точки зору їх потенційного впливу на забруднення повітря. Хоча переважна більшість тунелів має найбільшу вагу значення «Помірно мінімізує», можна побачити, що найбільш протяжна ділянка 7 має також і найвищу серед розглянутих альтернатив вагу значення «Суттєво мінімізує», відображаючи потенційно більш значний вплив побудови цього тунелю на відповідний фактор.

На основі таблиці 2, і аналогічних таблиць, що відповідають іншим факторам ризику, були розраховані локальні ваги ділянок відносно кожного з факторів ризику, як це потрібно для процедури методу аналізу ієрархій. Для цього формувались матриці парних порівнянь ділянок відносно кожного з факторів ризику, за допомогою наступного співвідношення:

$$d_{ij}^{(f)} = -2(w_{i,n}^{(f)} - w_{j,n}^{(f)}) - (w_{i,c}^{(f)} - w_{j,c}^{(f)}) + (w_{i,n}^{(f)} - w_{j,n}^{(f)}) + 2(w_{i,c}^{(f)} - w_{j,c}^{(f)}), i, j \in \overline{1,8}, \quad (1)$$

де f – фактор ризику; $w_{i,n}^{(f)}$ – оцінка значення «не впливає» для ділянки i і фактору ризику f ; $w_{i,c}^{(f)}$, $w_{i,n}^{(f)}$, $w_{i,c}^{(f)}$ – оцінки значень, відповідно, «частково мінімізує», «помірно мінімізує» і «суттєво мінімізує» для ділянки i і фактору ризику f .

На основі співвідношення (1) легко довести, що $d_{ij}^{(f)} = -d_{ji}^{(f)}$, $d_{ii}^{(f)} = 0$, тобто матриця, задана цими величинами, буде коректною адитивною матрицею парних порівнянь. Також легко довести, що $\forall_{i,j,f} d_{ij}^{(f)} \in [-4; 4]$ (крайні випадки спостерігаються лише тоді, коли одна ділянка має оцінку значення «не впливає», рівну 1, тоді як друга ділянка має оцінку значення «суттєво мінімізує», рівну 1). Перейдемо до мультиплікативної матриці за допомогою співвідношення (2):

$$d'_{ij}{}^{(f)} = 9^{\frac{d_{ij}^{(f)}}{4}}. \quad (2)$$

Матриця D' на основі співвідношень (2) буде коректною мультиплікативною матрицею, до якої застосовні методи отримання ваг [25]. Крім того, легко довести, що вона буде теоретично узгодженою, а отже отримані ваги не залежать від способу їх розрахунку. Скористаємось методом власних векторів ЕМ [25] для їх розрахунку. Для розглянутих ділянок тунелів локальні ваги за кожним із критеріїв наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Локальні ваги тунелів відносно факторів ризику (найбільше значення серед всіх ділянок для кожного фактору виділено напівжирним)

Table 3. Local weights of the sites respective to the risk factor (the highest value among all sites for each factor is bolded)

№ тунелю	Забруднення повітря	Шум і динамічні впливи	Дорожні затори	Дорожні аварії	Протяжність маршруту сполучення	Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів
1	0,119752	0,142614	0,073593	0,118965	0,080317	0,084207
2	0,121742	0,116512	0,142816	0,137003	0,133499	0,125402
3	0,108121	0,097731	0,126838	0,095813	0,144171	0,145211
4	0,10167	0,081887	0,139329	0,068121	0,149165	0,146573
5	0,153839	0,149184	0,152463	0,162258	0,14096	0,147948
6	0,108776	0,101953	0,134738	0,099405	0,137292	0,126717
7	0,152075	0,164418	0,099496	0,170481	0,082192	0,100114
8	0,134026	0,145702	0,130728	0,147954	0,132404	0,123827

Як бачимо з табл. 3, тунель 5 має найвищі значення впливу на фактори ризику «Забруднення повітря», «Дорожні затори», «Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів»; тунель 7 має найвищі значення впливу на фактори ризику «Шум і динамічні впливи», «Дорожні аварії»; тоді як тунель 4 має найвищий показник впливу на фактор «Протяжність маршруту сполучення».

Для більш комплексного оцінювання потрібна інтегрована оцінка на основі методу аналізу ієрархій. Для неї, окрім локальних ваг альтернатив ділянок відносно факторів ризику, потрібні також оцінки власне факторів ризику. Тут пропонуються два підходи:

- 1) використання в якості ваги оцінки важливості відповідного фактору ризику, отриманої в результаті модифікованого методу морфологічного аналізу (табл. 1);
- 2) використання окремого експертного оцінювання для порівняння критеріїв, і визначення ваг на основі методів обробки матриць парних порівнянь.

В першому підході процес є більш автоматизований, оскільки він не потребує додаткових вхідних даних, і враховує потреби конкретної ділянки (усі ризики мають рівну пріоритетність і вагу), тоді як другий підхід є більш гнучкий, і дозволяє оцінити рішення з урахуванням цілей і вимог осіб, що приймають рішення (пріоритетний ризик при цьому має збільшену вагу).

Другий підхід проілюстрований оцінюванням факторів трьома експертами, що ставлять різні цілі при визначенні пріоритетності ділянок: 1) з точки зору безпеки; 2) з точки зору екології та кліматичної нейтральності; 3) з точки зору ефективності транспортної системи. При цьому враховується весь спектр ризиків, але пріоритетна роль (збільшена вага) відводиться в цьому випадку саме цільовому фактору. Відповідні матриці парних порівнянь факторів, і їх результуючі ваги наведені в табл. 4–6. Ваги були отримані методом власних векторів ЕМ, неузгодженість матриць парних порівнянь не перевищувала порогові значення [25].

Таблиця 4. Ваги факторів ризику при пріоритезації безпеки громадян
Table 4. Risk factor weights when city dwellers' safety is prioritized

№ фактору	1	2	3	4	5	6	Вага
1. Забруднення повітря	1	2	1/2	1	1/2	1/8	0,062
2. Шум і динамічні впливи	1/2	1	1/4	1/2	1/4	1/9	0,035
3. Дорожні затори	2	4	1	5	5	1/6	0,194
4. Дорожні аварії	1	2	1/5	1	1	1/8	0,059
5. Протяжність маршруту сполучення	2	4	1/5	1	1	1/8	0,08
6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	8	9	6	8	8	1	0,569

Таблиця 5. Ваги факторів ризику при пріоритезації екології та кліматичної нейтральності
Table 5. Risk factor weights when ecology and comfort are prioritized

№ фактору	1	2	3	4	5	6	Вага
1. Забруднення повітря	1	2	4	3	6	7	0,417
2. Шум і динамічні впливи	1/2	1	2	1	3	4	0,202
3. Дорожні затори	1/4	1/2	1	1	1	2	0,106
4. Дорожні аварії	1/3	1	1	1	2	2	0,141
5. Протяжність маршруту сполучення	1/6	1/3	1	1/2	1	1	0,074
6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	1/7	1/4	1/2	1/2	1	1	0,06

Таблиця 6. Ваги факторів ризику при пріоритезації вирішення транспортних проблем
Table 6. Risk factor weights when solving transport problems is prioritized

№ фактору	1	2	3	4	5	6	Вага
1. Забруднення повітря	1	2	1/7	1/2	1/8	2	0,061
2. Шум і динамічні впливи	1/2	1	1/9	1/4	1/8	1	0,037
3. Дорожні затори	7	9	1	4	1	8	0,378
4. Дорожні аварії	2	4	1/4	1	1/3	4	0,125
5. Протяжність маршруту сполучення	8	8	1	3	1	8	0,362
6. Вразливість внаслідок воєнних атак або терактів	1/2	1	1/8	1/4	1/8	1	0,038

За допомогою отриманих ваг факторів ризику застосовувалась процедура дистрибутивного синтезу методу аналізу ієрархій [19]. Отримані за допомогою обох підходів оцінки ділянок, а також відповідні ранжування, наведені в табл. 7 (у другому підході розглянуто три альтернативні варіанти). Порівняння ранжувань тунелів у випадках пріоритетної ролі безпекового та кліматичного (екологічного) ризиків при реалізації ієрархічного підходу (підхід 2) наведено на рис. 2.

Таблиця 7. Порівняння ранжувань ділянок, отриманих різними підходами
Table 7. Comparison of site rankings by different approaches

№ тунелю	Підхід 1		Підхід 2 (безпека)		Підхід 2 (екологія)		Підхід 2 (транспорт)	
	Вага	Ранг	Вага	Ранг	Вага	Ранг	Вага	Ранг
1	0,094089	8	0,088051	8	0,114315	5	0,087545	8
2	0,130132	4	0,129449	4	0,126161	4	0,135939	2
3	0,130925	3	0,134542	3	0,111164	7	0,12784	6
4	0,135222	2	0,135552	2	0,103144	8	0,129981	4
5	0,143032	1	0,14937	1	0,152633	1	0,149467	1
6	0,126896	6	0,125402	6	0,112015	6	0,128279	5
7	0,112028	7	0,108084	7	0,143301	2	0,107837	7
8	0,127675	5	0,12855	5	0,137267	3	0,134112	3

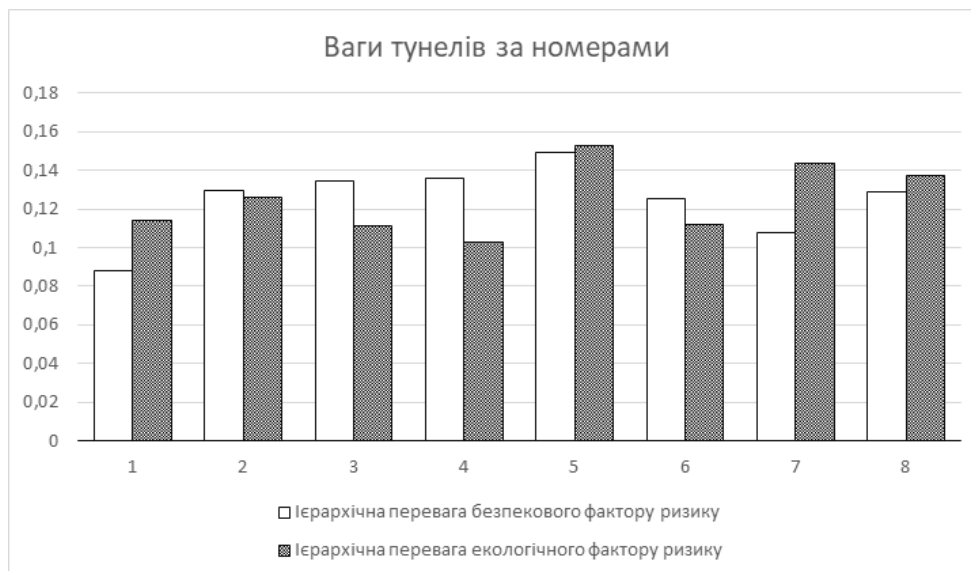


Рис. 2. Ваги тунелів при ієрархічній перевазі безпекового та кліматичного (екологічного) ризиків (підхід 2)

Fig. 2. Tunnel weights under hierarchical advantage of safety and climate (ecological) factors (approach 2)

Аналіз таблиць і діаграм свідчить, що у базовому випадку, коли всі розглянуті ризики мають рівну пріоритетність і вагу, перші місця рейтингу отримали тунелі 5, 4 і 3. Це пояснюється значним впливом цих тунелів на вирішення транспортної проблеми Києва, ефективним сполученням лівого та правого берегів Києва підземними автомагістралями та розвантаженням мостів, скороченням маршрутів, збільшенням безпеки та надійності тунельних переходів Дніпра над мостовими переходами у разі потенційних ударів з повітря тощо. У разі реалізації другого підходу й збільшення ієрархічної ваги тих чи інших пріоритетних ризиків (в залежності від їх суспільної важливості та цілей, що можуть бути закладені у планувальні рішення) маємо дещо інші результати моделювання. Прикметно, що у разі пріоритетної ролі безпекового (захисного) фактору лідерами рейтингу залишились тунелі 5, 4 і 3, що пов'язане з більшою вразливістю мостів у порівнянні з тунелями при воєнних і терористичних загрозах, а також стратегічною важливістю забезпечення в цих умовах безперешкодного зв'язку лівого і правого берегів Києва (такі споруди є важливими складовими критичної інфраструктури

міста). У разі визначення пріоритетної ролі кліматичного (екологічного) фактору найбільший рейтинг отримують тунелі 5, 7 і 8. Це пояснюється тим, що значна частина тунелю 5 дублює основну автомагістраль від площі Перемоги до річки Дніпро і значною мірою розвантажує середмістя від шкідливих автомобільних викидів, корок і транспортних простоїв, шумів, динамічних впливів тощо. Те саме стосується й тунелю 8, який додатково суттєво скорочує автомобільні шляхи між порталами тунелю. Тунель 7 є найбільш протяжним з усіх запланованих тунелів, він дублює й розвантажує протяжну автомагістраль, що огортає центральне ядро міста, й здатен значною мірою оптимізувати швидкість руху на магістралі й зменшити транспортне забруднення повітря. Вага фактору кліматичної нейтральності матиме пріоритетне значення в повоєнному відновленні міст України, враховуючи міжнародні зобов'язання країни та прийнятий Верховною Радою Закон України "Про основні засади державної кліматичної політики" (від 08.10.2024). Слід звернути увагу, що в обох розглянутих підходах і в усіх ієрархічних групах тунель 5 отримав найвищий рейтинг, що дає підстави рекомендувати його як пріоритетний (першочерговий) для будівництва.

6. Висновки. 1. Прискорення розвитку підземного будівництва у великих містах України буде мати пріоритетне значення в повоєнному відновленні країни та реалізації міжнародних інфраструктурних проєктів, що значною мірою зумовлене пріоритетними впливами міського підземного простору (зокрема – підземних транспортних мереж) на безпекові та кліматичні (екологічні) чинники. Перегляд довоєнних планів розвитку міста, зокрема великих інфраструктурних проєктів тунельного будівництва, потребує прийняття науково обґрунтованих рішень щодо пріоритетності будівництва тунелів та уточнення трас.

2. Серед важливих напрямків структурування складних проблем і врахування багатьох критеріїв впливу слід зазначити модифікований авторами метод морфологічного аналізу, який знайшов застосування в складних задачах планування міст і розглядається як важливий процес перетворення наукових методів в управлінські дії. Ефективність морфологічної моделі з підтримки прийняття рішень може бути підсилена шляхом синтезу з методом аналізу ієрархій, що забезпечує варіативний результат у відповідності до поставлених цілей (ієрархії ризиків). Така комбінована модель була застосована для аналізу мережі автомобільних тунелів Генерального плану м. Києва. Розроблений інструментарій дає міському самоврядуванню, державним органам влади, зацікавленим громадським організаціям та інвесторам ефективні можливості для прийняття проєктних рішень, виходячи із системних позицій і суспільної ваги факторів ризику.

3. Результати моделювання дозволяють рекомендувати групу тунелів 5, 4 і 3 як пріоритетні для будівництва в Києві за базовим варіантом і за безпековим фактором при ієрархічному підході. Цей же підхід визначає тунелі 5, 7 і 8 пріоритетними за кліматичним (екологічним) фактором. В обох розглянутих підходах і в усіх ієрархічних групах тунель 5 отримав найвищий рейтинг і може розглядатися як першочерговий для будівництва.

Список використаних джерел:

1. Shlomo, A. (2023). Urban expansion: theory, evidence and practice. *Buildings & Cities*, 4 (1), 124–138. <https://doi.org/10.5334/bc.348>
2. Radomska, M., Ratushnyuk, L., Yaroshenko, D., Yarokhmedova, I., Guz, V., Melnychenko V. (2023). Comparative analysis of strategies for adaptation of urban areas to climate changes. *Техніка будівництва*, 2 (39), 50–58. <https://doi.org/10.32347/tb.2023.2-39.0201>
3. Панкратова Н.Д., Гайко Г.І., Савченко І.О. (2020). Розвиток підземної урбаністики як системи альтернативних проєктних конфігурацій. Київ: Наукова думка, 134.
4. *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*; Gilbert, P. et al. (Eds.) (2013). Washington: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14670>
5. Vähäaho, I. (2014). Underground space planning in Helsinki. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6 (5), 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.05.005>
6. Генеральний план міста Києва. Основні положення (Проєкт), Київ. Available at: <https://www.slideshare.net/andrewvodiani/ss-230454864>.

7. Захарченко, П.В., Гайко, Г.І. (2015). Прогноз розвитку інфраструктури Києва в короткотерміновій перспективі. Перша міжнародна науково-практична конференція «Регіональна політика: законодавча політика і практична реалізація». Київ: КНУБА, 25–33.
8. Гайко, Г.І., Захарченко, П.В. (2016). Перспективи будівництва тунельних переходів Дніпра. Підводні технології, № 4, 72–79. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/817>
9. Zgurovsky, M.Z., Pankratova, N.D. (2007). System analysis: Theory and Applications. Springer, 475.
10. Zeiler, W. (2018). Morphology in conceptual building design. Technological Forecasting and Social Change, 126, 102–115. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.012>.
11. Ritchey, T. (2018). General morphological analysis as a basic scientific modelling method. Technological Forecasting and Social Change, 126, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.027>
12. Pankratova, N., Haiko, H., Savchenko, I. (2024). Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. The Urban Book Series, Springer, 256. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1>
13. Haiko, H., Savchenko, I.; Zgurovsky, M., Pankratova, N. (Eds.) (2022). Assessing territories for urban underground objects using morphological analysis-based model. System Analysis & Intelligent Computing. Springer, 93–113. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_6.
14. Панкратова, Н.Д., Савченко, І.О. (2015). Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування. Навчальний посібник. Київ: Наукова думка, 245.
15. Проектування міських територій: підручник: у 2 ч. Ч.1; за ред. В.Т. Семенова, І.Е. Линник. (2018). Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 449.
16. Nazarenko, I., Dedov, O., Bernyk, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A., Nazarenko, M. et. al.; Nazarenko, I. (Ed.) (2021). Assessment of the current state of parameters and operating modes of technological technical systems. Dynamic processes in technological technical systems. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 3-13. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7>
17. Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1 (1), 83–98. <http://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
18. Saaty, T.L., De Paola, P. (2017). Rethinking design and urban planning for the cities of the future. Buildings, 7 (3), 76. <https://doi.org/10.3390/buildings7030076>.
19. Панкратова, Н.Д., Недашківська, Н.І. (2010). Моделі і методи аналізу ієрархій: Теорія. Застосування: Навчальний посібник. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 371.
20. Pankratova, N.D., Nedashkovskaya, N.I. (2014). Hybrid Method of Multicriteria Evaluation of Decision Alternatives Cybernetics and Systems Analysis, 50 (5), 701–711. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9660-2>
21. Alvarez, A., Ritchey, T. (2015). Applications of General Morphological Analysis: From Engineering Design to Policy Analysis. Acta Morphologica Generalis 4 (1).
22. Haiko, H.I., Savchenko, I.O., Matviichuk, I.O. (2019). Development of a morphological model for territorial development of underground city space. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 3, 92–98. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/14>
23. Pankratova, N.D., Haiko, H.I., Savchenko, I.O. (2021). Morphological model for underground crossings of water objects. System Research and Information Technologies, 2021 (4), 53–67. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04>
24. Nedashkovskaya, N. (2022). Comparison Analysis of Prioritization Quality Criteria Using Paired Comparison Method of Prioritization. IEEE 3rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, Proceedings. <https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9923027>
25. Pankratova, N.D., Nedashkovskaya, N.I. (2007). Method for processing fuzzy expert information in prediction problems. Part I. Journal of Automation and Information Sciences, 39 (4), 26–36. <https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v39.i4.30>

References:

1. Shlomo, A. (2023). Urban expansion: theory, evidence and practice. Buildings & Cities, 4 (1), 124–138. <https://doi.org/10.5334/bc.348>
2. Radomska, M., Ratushnyuk, L., Yaroshenko, D., Yarokhmedova, I., Guz, V., Melnychenko V. (2023). Comparative analysis of strategies for adaptation of urban areas to climate changes. Техніка будівництва, 2 (39), 50–58. <https://doi.org/10.32347/tb.2023.2-39.0201>

3. Pankratova, N.D., Haiko, H.I., Savchenko, I.O. (2020). Rozvytok pidzemnoii urbanistyky iak systemy alternatyvnykh proiektnykh konfiguratsii. Kyiv: Naukova dumka, 134. {In Ukrainian}
4. Underground Engineering for Sustainable Urban Development; Gilbert, P. et al. (Eds.) (2013). Washington: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/14670>
5. Vähäaho, I. (2014). Underground space planning in Helsinki. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 6 (5), 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.05.005>
6. Heneralnyi plan mista Kyieva. Osnovni polozhennia (Proiekt), Kyiv. Available at: <https://www.slideshare.net/andrewvodiany/ss-230454864>. {In Ukrainian}
7. Zakharchenko, P.V., Haiko, H.I. (2015). Prohnoz rozvytku infrastruktury Kyieva v korotkotermynovii perspektyvi. Persha mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia “Rehionalna polityka: zakonodavcha polityka i praktychna realizatsiia”. Kyiv: KNUBA, 25–33. {In Ukrainian}
8. Haiko, H.I., Zakharchenko, P.V. (2016). Perspektyvy buduvannia tunelnykh perekhodiv Dnipra. Pidvodni tekhnolohii, 4, 72–79. <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/817> {In Ukrainian}
9. Zgurovsky, M.Z., Pankratova, N.D. (2007). System analysis: Theory and Applications. Springer, 475.
10. Zeiler, W. (2018). Morphology in conceptual building design. Technological Forecasting and Social Change, 126, 102–115. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.012>.
11. Ritchey, T. (2018). General morphological analysis as a basic scientific modelling method. Technological Forecasting and Social Change, 126, 81–91. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.027>
12. Pankratova, N., Haiko, H., Savchenko, I. (2024). Modeling the Underground Infrastructure of Urban Environments. A Systematic Approach. The Urban Book Series, Springer, 256. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-47522-1>
13. Haiko, H., Savchenko, I.; Zgurovsky, M., Pankratova, N. (Eds.) (2022). Assessing territories for urban underground objects using morphological analysis-based model. System Analysis & Intelligent Computing. Springer, 93–113. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94910-5_6.
14. Pankratova, N.D., Savchenko, I.O. (2015). Morfolohichniy analiz. Problemy, teoriia, zastosuvannia. Navchalnyi posibnyk. Kyiv: Naukova dumka, 245. {In Ukrainian}
15. Proiektuvannia miskykh terytorii: pidruchnyk: u 2 ch. Ch. 1; Semenov, V.T., Lynnyk, I.E. (Eds.) (2018). Kharkiv: KhNUMH im. O. M. Beketova, 449. {In Ukrainian}
16. Nazarenko, I., Dedov, O., Bernyk, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A., Nazarenko, M. et. al.; Nazarenko, I. (Ed.) (2021). Assessment of the current state of parameters and operating modes of technological technical systems. Dynamic processes in technological technical systems. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 3-13. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7>
17. Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. International Journal of Services Sciences, 1 (1), 83–98. <http://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
18. Saaty, T.L., De Paola, P. (2017). Rethinking design and urban planning for the cities of the future. Buildings, 7 (3), 76. <https://doi.org/10.3390/buildings7030076>.
19. Pankratova, N.D., Nedashkivska, N.I. (2010). Modeli i metody analizu hierarkhii: Teoriia. Zastosuvannia: Navchalnyi posibnyk. Kyiv: IVTs «Vydavnytstvo «Politekhnik», 371. {In Ukrainian}
20. Pankratova, N.D., Nedashkovskaya, N.I. (2014). Hybrid Method of Multicriteria Evaluation of Decision Alternatives Cybernetics and Systems Analysis, 50 (5), 701–711. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9660-2>
21. Alvarez, A., Ritchey, T. (2015). Applications of General Morphological Analysis: From Engineering Design to Policy Analysis. Acta Morphologica Generalis 4 (1).
22. Haiko, H.I., Savchenko, I.O., Matviichuk, I.O. (2019). Development of a morphological model for territorial development of underground city space. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 3, 92–98. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-3/14>
23. Pankratova, N.D., Haiko, H.I., Savchenko, I.O. (2021). Morphological model for underground crossings of water objects. System Research and Information Technologies, 2021 (4), 53–67. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.4.04>
24. Nedashkovskaya, N. (2022). Comparison Analysis of Prioritization Quality Criteria Using Paired Comparison Method of Prioritization. IEEE 3rd International Conference on System Analysis and Intelligent Computing, Proceedings. <https://doi.org/10.1109/SAIC57818.2022.9923027>
25. Pankratova, N.D., Nedashkovskaya, N.I. (2007). Method for processing fuzzy expert information in prediction problems. Part I. Journal of Automation and Information Sciences, 39 (4), 26–36. <https://doi.org/10.1615/jautomatinfscien.v39.i4.30>

УДК 621.926

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0306>**Микола Клименко**

кандидат технічних наук, доцент, 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

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

ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ПОМЕЛУ ЦЕМЕНТУ ТА ГРАНУЛЬОВАНИХ ШЛАКІВ

АНОТАЦІЯ. У статті розглянуто конструктивні особливості вертикальних валкових млинів, які використовуються для помелу цементу та гранульованих шлаків. Зроблено аналіз основних елементів конструкції, таких як валки, помольні столи та системи приводу, з акцентом на їх вплив на продуктивність та якість помелу. Досліджено як історію зміни конструкцій валкових млинів, так і впровадження новітніх інженерних рішень, спрямованих на підвищення ефективності процесу подрібнення, зменшення енергоспоживання та поліпшення експлуатаційних характеристик обладнання. Визначено переваги застосування вертикальних валкових млинів у порівнянні з традиційними технологіями помелу при виробництві цементу та шлаколузних матеріалів.

Ключові слова: вертикальні валкові млини, помел гранульованих шлаків, системи приводу, продуктивність млинів, енергоефективність, новітні інженерні рішення, експлуатаційні характеристики.

1. Постановка проблеми. Вертикальні валкові млини (Vertical Roller Mills, VRM) на сьогодні є важливим обладнанням в цементній, гірничій та енергетичній галузях промисловості. Їх застосовують для помелу як сировинних матеріалів, так і для цементу, шлаку, вугілля, вапна, гіпсу тощо. На даний час вертикальні валкові млини стали провідною технологією для помелу шлаків у цементній промисловості, оскільки шлаковий цемент (або добавка до цементу з доменного шлаку) є важливим матеріалом, що забезпечує високу міцність та стійкість до агресивних середовищ.

Одним з ключових викликів, пов'язаних з даним устаткуванням, є розробка конструкцій млинів, які забезпечують максимальну продуктивність при мінімальному споживанні енергії. Енергоефективність є критичним фактором для процесів промисловості будівельних матеріалів. Тому важливо дослідити шляхи зменшення енергоспоживання під час помелу, включаючи вдосконалення систем приводу та автоматизації процесів. Це включає пошук оптимальної форми валків та помольних столів, а також дослідження з проблем підвищення зносостійкості робочих елементів, що потребує застосування новітніх матеріалів або покриттів для зменшення їх зносу, оскільки вертикальні валкові млини працюють у складних умовах високого тертя та ударних навантажень. При цьому вертикальні млини часто піддаються значним вібраціям під час експлуатації, що може впливати на їх роботу та термін служби. Отже, вагомим завданням є розробка конструкцій, що зменшують вібраційні навантаження.

Важливим аспектом також є досягнення рівномірного помелу цементу та шлаків.

Різна фракція помелу може впливати на якість кінцевого продукту, тому потрібно визначити параметри, що сприяють рівномірному помелу за мінімальних втрат матеріалу. Враховуючи, що вертикальні валкові млини використовуються для помелу різних матеріалів (цементу, гранульованих шлаків, шлаколуних цементів), важливим завданням є розробка універсальних конструкцій, які будуть ефективно працювати з різними типами сировини. Крім того, помел цементу та шлаків супроводжується викидами пилу, а отже необхідно враховувати питання зменшення впливу на довкілля шляхом впровадження технологій пиловловлювання та зниження викидів.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій. Помольні валкові агрегати високого тиску (HPGR) у замкнутому контурі з повітряною класифікацією знайшли певне використання в цементній промисловості з 1985 року для ефективного первинного помелу за рахунок зниження вартості електроенергії, а також збільшення потужності, при цьому створюючи високоякісний продукт розміром до 25 мкм [3]. Широковідома конструкція вертикальних валкових млинів (VRM) стала доступною з початку 1900-х років і є загальноприйнятою технологією в цементній, енергетичній промисловості та промисловості переробки корисних копалин. Вертикальні валкові млини визнані одними з найефективніших доступних на даний момент пристроїв для помелу та можуть використовуватися для одночасного помелу і сушіння матеріалів, таких як вапняк, негашене вапно, цементна сировина, тальк, боксит, магнезит, фосфат, польовий шпат, барити, графіт і вугілля. Домінуючим використанням вертикальних валкових млинів є сировина для виробництва цементу та помелу вугілля, але є також чимало прикладів використання VRM у гірничій промисловості: Schaefer в своїй роботі [2] описує використання вертикальних валкових млинів для помелу фосфату, тоді інші повідомляють про застосування VRM при помелі мідного, залізного та олов'яного шлаку.

Jankovic A., Ozer Ç. в роботі [1] дослідили новітні технології сухого помелу мінеральних матеріалів і руд у помольних валкових апаратах високого тиску (HPGR) та вертикальних роликів млинах (VRM). Оскільки видобувна промисловість стикається з проблемами високої вартості енергії, дефіциту води та суворішими екологічними вимогами, ці технології розглядаються як енергоефективна альтернатива традиційним методам помелу. У статті проводиться пілотне тестування обох технологій на базальті. Результати цього та інших [4] досліджень показують значну економію енергії в порівнянні з кульовими млинами: HPGR споживає на 20-30% менше енергії, а VRM – на 10-30% залежно від типу.

У статті [5] Lucas R.D. Jensen, Erling Fundal та Per Møller досліджували механізм зношування зносостійких частин вертикальних валкових млинів під час помелу сировинних матеріалів. Дослідження охоплювало макроскопічний і мікроскопічний аналіз зношених частин, а також лабораторні експерименти, що імітують процеси зносу. Використовуючи прозорі вали і столи, дослідники спостерігали рух частинок у шарі матеріалу під час подрібнення, що дозволило виявити зони з високими навантаженнями та деформаціями. Основний механізм зношування – це двокорпусне абразивне стирання, яка спричиняє інтенсивне зношування в зонах високого тиску. Аналіз мікроструктури показав, що тріщини під поверхнею зносостійкого шару валків викликають відшарування цих шарів від основного масиву матеріалу.

Jung O. у своєму дослідженні [6] вертикальних роликів млинів, що використовуються в цементній промисловості для помелу цементної сировини, пуцолану і доменного шлаку, а також для остаточного помелу цементу, наводить дані щодо зношування і зазначає, що втрати зносостійких поверхонь тертя можна мінімізувати шляхом вибору матеріалів для захисту від зносу, таких як легований чавун, підбір правильної форми та розмірів деталей, що зношуються, зменшення частки високоабразивних компонентів тощо. Ці заходи подовжують термін служби деталей, що зношуються, і забезпечують ефективне змелювання дуже абразивних вихідних матеріалів.

У роботі [7] Kalyagina N. було проведено оцінку працездатності млина з гладкими тарілчастими валками. У процесі дослідження було виявлено причину руйнування секторів млина виробництва компанії FLSmidth. Проведене дослідження виявило причини руйнування деталей валкового млина: при одночасному впливі робочого навантаження та зміщення секторів, що виникає через інтенсивне зношування, сумарні еквівалентні напруження перевищують значення межі витривалості при циклічному навантаженні. Отже, відбувається накопичення втомлюваного руйнування матеріалу, формування та зростання тріщин, що негативно позначається на працездатності млина.

3. Мета роботи. Встановити вплив конструктивного виконання вертикальних валкових млинів на ефективність процесу помелу цементу і шлаків.

4. Матеріали та методи. Для розуміння сучасних тенденцій розвитку вертикальних валкових млинів розглянемо основні етапи створення, розвитку та зміни конструкції таких машин для помелу цементу, шлаків та вугілля, які можна умовно можна поділити на кілька ключових періодів.

Перше покоління млинів (кінець XIX – початок XX століття). Винахід валкових млинів відбувся на межі століть як відповідь на необхідність підвищення ефективності помелу матеріалів. Перші конструкції вертикальних млинів ґрунтувалися на принципі роздавлювання матеріалу між роликками та робочою поверхнею (столом). Ці млини були базової конструкції і призначалися для помелу великих обсягів матеріалу без суттєвого контролю над кінцевим продуктом. Млини цього періоду мали відносно простий механізм із двома валками і столом для подрібнення. Основним завданням було механічне змелювання матеріалу шляхом стиснення, а самі конструкції характеризувалися невеликим тиском між валком та помольним столом, статичним необертним сепаратором та відсутністю системи рециркуляції матеріалу. Як результат, використання таких млинів обмежувалося помелом вугілля на електростанціях та попереднім цементної сировини перед помелом кульовими млинами.

Друге покоління валкових млинів (середина XX століття). У 1930-х роках у відповідь на зростання промислових масштабів виробництва вертикальні валкові млини отримали удосконалення, такі як інтеграція функцій сушки та подрібнення матеріалів. Це стало можливим завдяки впровадженню систем подачі гарячого повітря для сушіння матеріалів під час помелу. Продуктивність збільшувалася, але конструкція залишалася досить простою. У 1960-ті було вдосконалено конструкцію роликів і столів для забезпечення більш рівномірного помелу та зниження витрат енергії. Обладнання стало здатне досягати тиску у 140-150 бар, оснащувалося динамічним сепаратором, а також двома або трьома вентиляторами, які забезпечували рециркуляцію до 30% завантаження. У цей період почали звертати увагу на підвищення енергоефективності млинів. Були розроблені конструкції з більшою кількістю валків, що дало змогу зменшити енерговитрати на одиницю продукції. VRM почали витісняти кульові млини завдяки значно вищій енергоефективності. Через значно збільшений тиск до конструкції було введено окрему систему примусового змащування, а самі млини почали широко використовуватися для помелу цементу.

Третє покоління млинів (кінець XX століття). З 1970-х млини оснащувалися змінними соплами подачі гарячого повітря навколо помольного стола, завдяки чому вдалося уникнути утворення турбулентних потоків повітря всередині млина. Була суттєво перероблена конструкція ґратчастого ротора обертового сепаратора, який спільно зі статичним жалюзі забезпечували більш ефективно виділення фракції готового продукту, а отже зменшували витрати на надмірне змелювання. На цей період припадає початок впровадження автоматизованих систем контролю, з'явилися можливості точного регулювання тиску валків, швидкості обертання та інших параметрів, що дозволило оптимізувати помел різних матеріалів – від цементу до вугілля. Це дозволило підвищити продуктивність і контроль над якістю продукту та знизити енергоспоживання. У 1980-1990-х роках вертикальні валкові млини стали широко застосовуватися не лише в цементній, але й

у гірничій промисловості для помелу твердих порід, вугілля та інших матеріалів. В конструкції почали використовувати більше валків і покращувати їх дизайн для зменшення зношуваності. Млини стали більш потужними і універсальними, здатними обробляти більші об'єми матеріалів з різними властивостями. Паралельно з тим зростає увага до технологій зниження зношуваності та покращення охолодження валків.

Четверте покоління (початок ХХІ століття) характеризується використанням нових матеріалів для виготовлення валків і столів, які значно зменшили їх зношуваність. Використання сплавів і композитних матеріалів дозволило збільшити термін служби робочих елементів млинів, зменшивши витрати на технічне обслуговування. Значний розвиток отримали системи автоматизації та моніторингу процесів у реальному часі, що дозволило точно контролювати параметри подрібнення, тиск валків, швидкість обертання столу та повітряний потік. Це забезпечило стабільнішу якість продукту та зниження енерговитрат. З огляду на підвищення вимог до екологічних стандартів, у конструкції валкових млинів були запроваджені нові технології, що знижують рівень викидів пилу та споживання енергії.

Сучасний етап. Нинішні вертикальні валкові млини оснащені інтелектуальними системами управління, що використовують технології штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації процесу помелу. Такі системи аналізують дані в режимі реального часу та автоматично коригують робочі параметри для досягнення максимальних показників продуктивності. Сучасні млини орієнтовані на сталий розвиток, зокрема на мінімізацію споживання енергії та зниження викидів CO₂. Впровадження технологій рекуперації тепла дозволяє досягати ще більшої ефективності в промислових процесах. Для зниження рівня шуму та вібрацій застосовуються вдосконалені конструкції, що робить валкові млини більш придатними для використання в екологічно чутливих зонах. Нові конструкції передбачають модульність, що дозволяє швидко замінити частини та адаптацію млина під різні типи матеріалів.

5. Результати. Принципова схема вертикального валкового млина показана на рисунку 1. Матеріал, що подрібнюється, подається в центр розмельного поворотного столу 8 через живильний жолоб, звідки він відцентровими силами подається під валки 5 і, утворюючи шар матеріалу, змелюється. Для зменшення зношування розмельний стіл захищається футерувальними плитами, а валки – бандажами. Надалі змелений матеріал перетікає через край розмельного столу. Потік гарячого повітря, що піднімається через отвори 13 по периметру поворотного столу 8, підхоплює і транспортує цей матеріал вгору до сепаратора 2, де готовий продукт продовжує підніматися вгору і, проходячи через гратчастий обертовий ротор 1, виходить із млина. При цьому, грубі частинки осаджуються вниз і повертаються до млина для подальшого помелу через завантажувальний конус 3, оснащений випускною заслінкою 4. Надто грубі частинки, які заважкі, для їх піднімання повітряним потоком, виходять з нижньої частини млина через лоток грубого продукту 12 і потребують механічного транспортування назад для подачі до млина. Після виходу з млина дрібний продукт проходить через рукавний фільтр або циклон та рукавний фільтр, щоб відокремити тверді частинки від потоку повітря.

Отже, помел матеріалу у вертикальних валкових млинах досягається шляхом стиснення та зсуву у шарі частинок; поверхневий контакт між частинками розподіляє напруження в шарі матеріалу, що змелюється. При досягненні достатньої величини напруження утворюються мікротріщини, а компресійне подрібнення з регульованою часткою зсувних зусиль призводить до енергоефективного зменшення розміру порівняно з барабанними млинами.

Схематичне зображення потоку матеріалу при помелі у вертикальних валкових млинах зображено на рисунку 2.

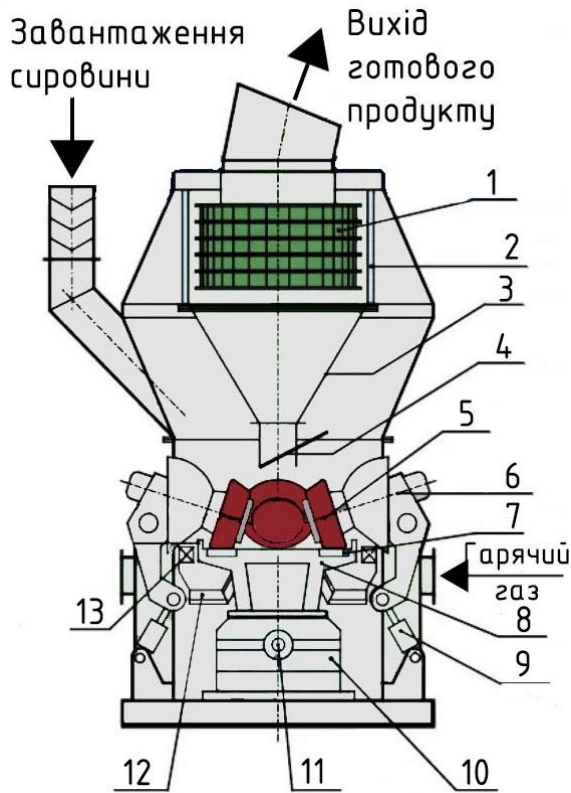


Рисунок 1. Конструкція вертикального валкового млина

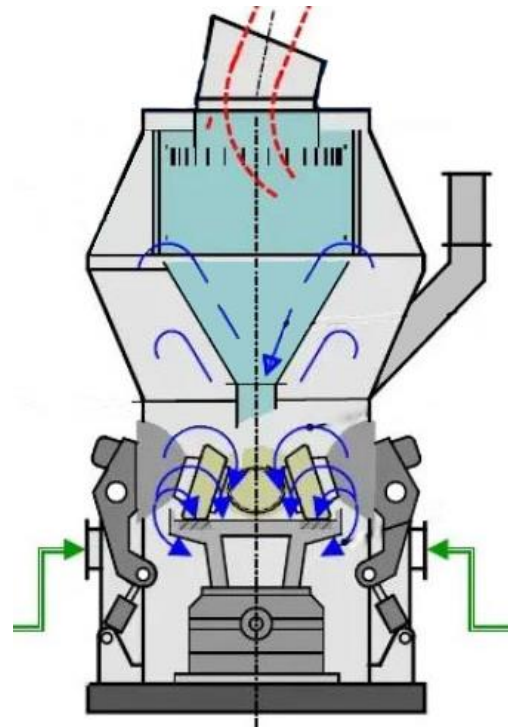


Рисунок 2. Схематичне зображення потоку матеріалу при помелі у вертикальних валкових млинах

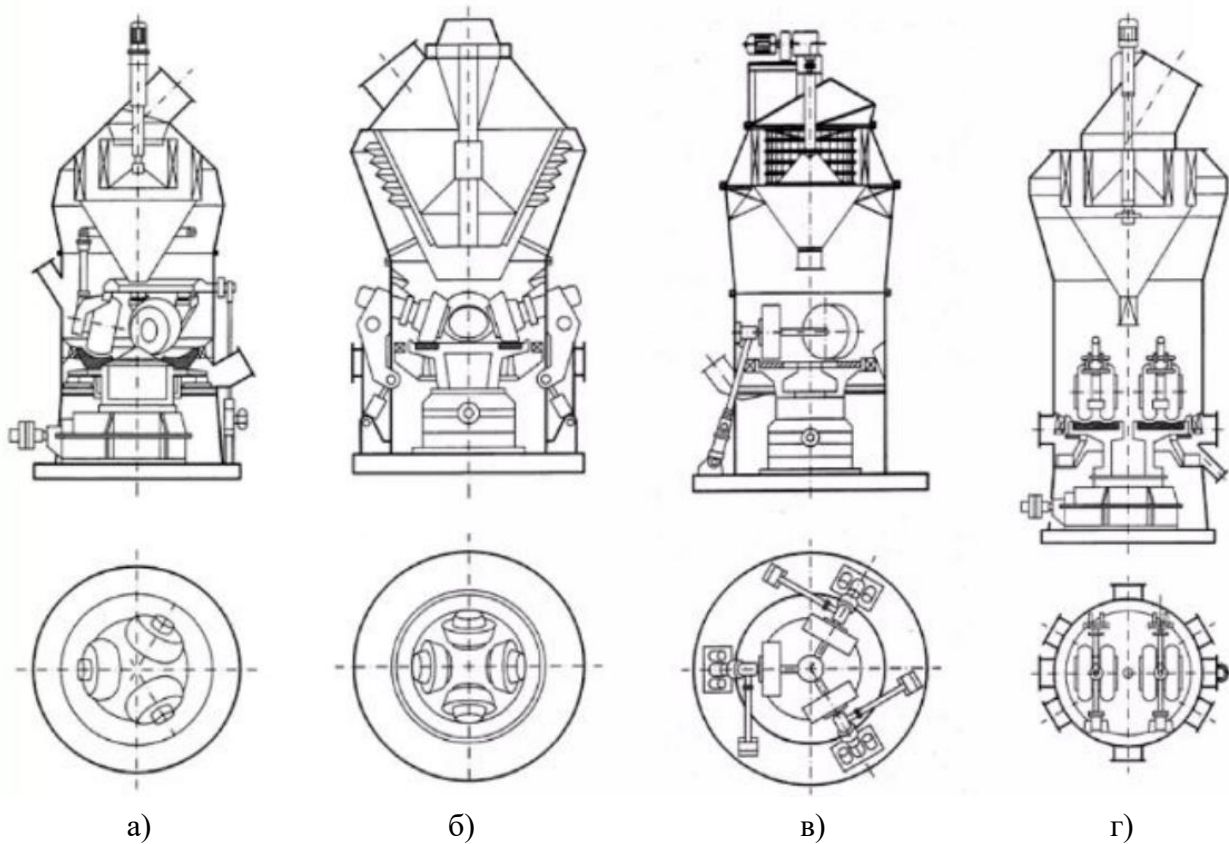


Рисунок 3. Особливості конструктивного виконання робочих органів провідних світових виробників вертикальних валкових млинів:
 а) – Gerb Pfeiffer; б) – Loesche; в) – FLS Atox; г) – Krupp Polysius

На сьогодні основними виробниками в світі, які здійснюють наукові дослідження і проектування вертикальних валкових млинів є: «Loesche», «FLS Atox», «Gerb Pfeiffer» та «Krupp Polysius». Конструкції робочих органів даних виробників відрізняються кардинальним чином, що змушує розглядати кожен з таких механізмів окремо (рисунок 3).

6. Висновки.

Вертикальні валкові млини мають значні перспективи розвитку завдяки своїй енергоефективності, екологічності та адаптивності до різних матеріалів. Подальший розвиток технологій автоматизації і інтелектуальних систем управління дозволить оптимізувати процес помелу, знизивши споживання енергії та мінімізуючи викиди. Використання сучасних матеріалів і модульних конструкцій сприяє підвищенню надійності та зменшенню витрат на обслуговування. Вертикальні валкові млини також мають переваги у зниженні експлуатаційних витрат і скороченні витрат на ремонт завдяки тривалішому терміну служби компонентів. Вони стають ключовою технологією в цементній, металургійній і вугільній промисловостях, забезпечуючи стабільний та ефективний помел.

Список використаних джерел

1. Jankovic, A., Ozer, Ç., Valery, W., & Duffy, K. (2016). Evaluation of HPGR and VRM for dry comminution of mineral ores. *Journal of Mining and Metallurgy A: Mining*. 52. 11-25.
2. Schaefer H.V. (2001) Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals, *Minerals Engineering*, 14, 10, 1155-1160.
3. Aydogan, Namik & Ergun, Levent & Benzer, Hakan. (2006). High pressure grinding rolls (HPGR) applications in the cement industry. *Minerals Engineering - MINER ENG*. 19. 130-139.
4. Breaking Down Energy Consumption in Industry Grinding Mills. Bouchard, J, et al. 4, s.l.: CIM Journal, 2019, Vol. 10, pp. 157-164.
5. Lucas R.D. Jensen a,* , Erling Fundal b , Per Møller (2011) Wear mechanism of abrasion resistant wear parts in raw material vertical roller mills/ *Wear* 271 (2011) 2707– 2719
6. Jung O. (2000). Wear protection in vertical roller mills. *ZKG International*. 2000;31(9):252–261.
7. Kalyagina N.V. et al. (2020) *Journal of Engineering Researches*. 2020;21(3):181–188.

УДК 621.876

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024.40.0307>**Юрій Човнюк,**

кандидат технічних наук,
доцент кафедри міського будівництва,
Київський Національний університет будівництва та архітектури
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0608-0203>
E-mail: ychovnyuk@ukr.net

Петро Чередніченко,

доцент кафедри міського будівництва,
Київський Національний університет будівництва та архітектури
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-661X>
E-mail: petro_che@ukr.net

Наталія Шудра,

ст. викладач кафедри інженерної геодезії,
Київський Національний університет будівництва та архітектури
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5416-7680>
E-mail: Shudra_n@ukr.net

Артем Лютіков,

асистент кафедри міського будівництва,
Київський Національний університет будівництва та архітектури
Повітрофлотський пр., 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6866-9857>
E-mail: liutikov.aa@knuba.edu.ua

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕМІЩЕННЯ І РОЗГОНУ ВАНТАЖНОГО ВІЗКА МОСТОВОГО КРАНА У РЕЖИМІ ГАСІННЯ НЕКЕРОВАНИХ КОЛИВАНЬ ВАНТАЖУ

АНОТАЦІЯ. У роботі проведено моделювання та оптимізація процесів переміщення і розгону вантажного візка мостового крана у режимі гасіння некерованих коливань вантажу. Для динамічної системи плоского маятника із затуханням коливань, яка описує коливання вантажу мостового крана на гнучкому канатному підвісі у окремії вертикальній площині, запропоновано використовувати сплайни по часу третього порядку, які моделюють рух та прискорення точки підвісу вантажу у горизонтальному напрямку руху вантажного візка.

Для з'ясування часової залежності кута відхилення вантажного крана від гравітаційної вертикалі запропоновано використати методи класичного варіаційного числення (рівняння Ейлера-Пуассона), котрі дозволяють оптимізувати (мінімізувати) величину вказаного кута у процесі розгону вантажного візка з вантажем, підвішеним на канаті мостового крана.

Отриманий аналітичний розв'язок задачі гасіння залишкових некерованих коливань вантажу мостового крана, які зазвичай виникають після повного розгону чи гальмування точки підвісу вантажу на вантажному візку. Для виведення залежностей використаний аналітичний підхід задля розрахунку величини кута відхилення вантажного канату мостового крана від гравітаційної вертикалі у залежності від прискорення і переміщення точки підвісу вантажу.

Розглянута проблема розхитування вантажу, який переміщується мостовим краном, вирішена новим способом, котрий дозволяє повністю уникнути маятникових просторових коливань вантажу на канатному підвісі. При цьому використаний математичний апарат лінійної алгебри (правило Крамера, зокрема), який дозволяє аналітичним шляхом встановити закон руху у часі канату з вантажем, кут відхилення котрого від вертикалі приймає мінімальні значення у процесі розгону вантажного візка.

Ключові слова: мостовий кран, траєкторія вантажу, гасіння коливань, розхитування, оптимізація, переміщення, розгін, вантажний візок, канат.

OPTIMIZATION OF THE PROCESSES OF MOVEMENT AND ACCELERATION OF THE OVERHEAD CRANE TROLLEY IN THE MODE OF DAMPING UNCONTROLLED LOAD OSCILLATIONS

ABSTRACT. *The paper deals with the modeling and optimization of the processes of movement and acceleration of a bridge crane trolley in the mode of damping uncontrolled oscillations of the load. For the dynamic system of a flat pendulum with vibration damping, which describes the oscillations of a bridge crane load on a flexible rope suspension in a separate vertical plane, it is proposed to use third-order time splines that model the motion and acceleration of the load suspension point in the horizontal direction of the trolley's movement.*

To determine the time dependence of the angle of deviation of the crane from the gravitational vertical, it is proposed to use the methods of classical calculus of variations (Euler-Poisson equation), which allow optimizing (minimizing) the value of this angle in the process of accelerating a trolley with a load suspended from the ropes of an overhead crane.

An analytical solution to the problem of damping residual uncontrollable oscillations of the overhead crane load, which usually occur after full acceleration or braking of the load suspension point on the trolley, is obtained. To derive the dependencies, an analytical approach was used to calculate the value of the angle of deviation of the overhead crane's cargo rope from the gravitational vertical, depending on the acceleration and displacement of the load suspension point.

The problem of loosening of a load moved by an overhead crane is considered and solved in a new way that allows to completely avoiding pendulum spatial oscillations of the load on a rope suspension. The mathematical apparatus of linear algebra (Kramer's rule, in particular) is used, which allows us to establish analytically the law of time motion of a rope with a load, the angle of deviation of which from the vertical takes minimum values in the process of acceleration of the cargo trolley.

Keywords: *overhead crane, load trajectory, vibration damping, sway, optimization, movement, acceleration, trolley, rope.*

1. Постановка проблеми. Переміщення вантажів мостовими кранами (МК) з нежерстким канатним підвісом вантажу викликає маятникові коливання вантажу, у яких присутня некерована компонента. Такі коливання суттєво збільшують тривалість циклу МК, знижують продуктивність та безпеку робіт [1-3]. Зростає небезпека зіткнень вантажу з об'єктами, присутніми у зоні переміщень, при цьому імовірними є і пошкодження самого вантажу, інших об'єктів й власне МК. У зв'язку з цим доцільно повністю згасити некеровану компоненту маятникових коливань вантажу як при його переміщенні, так і при досягненні вантажем цільової точки [4]. Особливо це актуально при переміщенні небезпечних вантажів: емностей з рідким металом (у металургійних цехах), горючими рідинами та ін.

Слід зазначити, що переміщення вантажів на гнучкому підвісі канатного типу, яке здійснюють, зокрема, опорні на одну або на дві балки мостові крани загального призначення, доцільно проводити саме у режимі гасіння вказаних вище некерованих маятникових коливань вантажу, і задля повного гасіння залишкової компоненти маятникових коливань вантажу при його переміщенні у окремій площині можливим є переміщення точки підвісу вантажу (вантажний візок, або міст МК) по заданій аналітично часовій залежності (траєкторії). Подібне переміщення, яке можливе за використання мехатронних систем управління рухом вантажного візка МК, не тільки знищить залишкову некеровану компоненту коливань, але і забезпечить заздалегідь визначену часову залежність кута відхилення вантажного канату МК від вертикалі.

2. Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Відомі методи синтезу траєкторії точки підвісу [3, 5-12] мають загальний недолік у вигляді порівняно великої похибки реалізації як кута відхилення вантажного канату МК від вертикалі, так і лінійних координат вантажу, який переміщується. Як правило, кут відхилення вантажного канату МК від вертикалі не відслідковується і не контролюється, а час переміщення вантажу зростає. Нормовані керовані відхилення вантажного канату МК від гравітаційної вертикалі при переміщенні вантажів необхідні. Надати вантажу горизонтального прискорення без відхилень вантажного канату від вертикалі неможливо! Але при цьому доцільно, щоб вказані відхилення були короткочасними й не перевищували заданих меж.

Відомі аналітичні залежності оптимального та квазіоптимального режимів керування маятниковою системою з рухливою точкою підвісу для задачі найшвидшого розгону (гальмування) з гасінням коливань [4]. На швидкість і прискорення точки підвісу накладені обмеження. Недолік відомого способу: розглядаються лише малі коливання маятника навколо положення рівноваги, відсутність певного (граничного) значення кута відхилення вантажного каната МК від вертикалі. Оптимальне управління носить релейний характер: прискорення точки підвісу приймає лише граничні значення. Гасіння коливань маятника відбувається не на усьому інтервалі часу робочого циклу, а лише у кінці розгону чи переміщення системи [4].

Відомі роботи по розв'язку задачі швидкодії для нелінійного маятника (приведення нелінійного маятника у стійке положення рівноваги) [13, 14]. Однак розглядається система з нерухомою точкою підвісу й прикладеним по кутовій координаті маятника моментом. Крім того, у відомих роботах не враховується дисипація енергії. Рівняння маятника з фіксованою точкою підвісу не підходять для опису розглянутої у даній роботі задачі як по структурі, так і за параметрами, які у них входять.

При розв'язуванні задачі гасіння коливань вантажів на канатному підвісі з рухливою верхньою точкою підвісу (з рухливою основою) знаходять застосування такі сучасні підходи, як застосування ПД – та ППД – регуляторів [5-9], апарату нечіткої логіки [3-10] та shaping-алгоритмів [11, 12]. У відповідності з ними здійснюється управління траєкторією верхньої точки підвісу вантажу.

У роботах [15, 16] розроблений алгоритм, котрий при заданих обмеженнях у виді максимальних швидкості й прискорення рухомої точки підвісу вантажу на МК (вантажного візка) синтезує неперервне (безступінчасте, нерелейне) управління точкою підвісу за допомогою частотно-регульованих приводів МК. Такими приводами оснащена низка МК, які виготовляються зараз. Алгоритм також враховує можливість великих кутів відхилення вантажного каната від гравітаційної вертикалі, що дозволяє підвищити швидкість переміщення й продуктивність функціонування МК. На граничне значення відхилення кута вантажного канату у процесі розгону і гальмування МК при цьому накладені жорсткі обмеження у вигляді його точного досягнення. Виконання цієї умови, на думку авторів [15, 16], суттєво підвищує продуктивність МК із урахуванням досягнення максимальних значень швидкості та прискорення рухливої точки підвісу. Проте даний підхід і його реалізація спряжені зі значними труднощами й вимагають наявності складного електронно-механічного обладнання. Крім того, у наведеному алгоритмі, на думку авторів даного дослідження, порушені причинно-наслідкові зв'язки у даній технічній системі, оскільки первісною є залежність у часі кута відхилення канату з вантажем від гравітаційної вертикалі, яка задається наперед, а рух вантажного візка регулюється цієї залежністю (кута відхилення канату від вертикалі у часі), хоча за логікою повинно бути навпаки.

Ця несумісність ліквідована у даному дослідженні. Крім того, знайдена оптимальна траєкторія руху вантажного візка, за якою прискорення цього руху мінімізоване у процесі розгону вантажного візка до сталого, нормативного значення швидкості руху. Моделювання, аналіз та оптимізація руху вантажного візка МК, який спричинює, у свою чергу, мінімальні відхилення вантажу від вертикалі і знижує суттєво виникаючі маятникові коливання у МК, побудовані на основі результатів, одержаних у роботах [17-20].

3. Мета роботи. Мета роботи полягає у обґрунтуванні фізико-механічної та математичної моделей, які адекватно описують та оптимізують процеси переміщення і розгону вантажного візка мостового крана, котрий функціонує у режимі гасіння некерованих залишкових коливань вантажу. Задля досягнення мети використаний математичний апарат класичного варіаційного числення, математичної фізики та теорії звичайних диференціальних рівнянь. Встановлення закономірностей руху вантажного візка засноване на сплайн-апроксимації у часі, а функціональної залежності від часу кута відхилення канату МК з вантажем – на апараті лінійної алгебри та методах розв'язку неоднорідних диференціальних рівнянь високого порядку лінійного типу.

4. Матеріали та методи.

1. *Формулювання задачі.* У даному дослідженні прийнята математична модель плоского маятника з рухомою точкою підвісу, яку всебічно аналізували автори [15, 16]. У процесі обчислювальних (чисельних) експериментів на ПЕОМ було встановлено, що для малих значень кутів відхилення канатів з вантажем ($<5^{\circ}$) просторові коливання вантажу можуть з порівняно невеликою похибкою подані як суперпозиція коливань у двох взаємно перпендикулярних площинах.

Як і у цитованих вище роботах, для системи плоского маятника були прийняті позначення: m – маса вантажу, кг; L – довжина вантажного канату МК від рухомої точки підвісу на вантажному візку (центр блоку роликів поліспасти) до центру мас вантажу, м; b – приведений до кутової координати коефіцієнт в'язкого тертя, який задає міру (рівень) дисипації енергії, Н·м·с/рад; q, \dot{q}, \ddot{q} – кут відхилення вантажного канату МК від гравітаційної вертикалі і його перші дві похідні по часу, відповідно рад, рад/с, рад/с²; $g=9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння; \ddot{x} – лінійне прискорення точки підвісу вантажу у горизонтальному напрямку руху вантажного візка, м/с².

Систему плоского маятника у «великих» змінних (припускаються відхилення вантажного канату понад $(10...15)^{\circ}$), описує відоме нелінійне диференціальне рівняння другого порядку [21-24]:

$$\ddot{q} + (2b/m) \cdot \dot{q} + (g/L) \cdot \sin q + (\ddot{x}/L) \cdot \cos q = 0. \quad (1)$$

При дослідженнях були прийняті припущення щодо постійної довжини вантажного канату L у процесі переміщення вантажу, про безступінчастий характер регулювання швидкості \dot{x} й прискорення \ddot{x} розгону та гальмування точки підвісу вантажу (вантажного візка МК, що забезпечує мехатронна система управління частотою обертання приводу) у горизонтальному напрямку й про надто малий вплив маси вантажу, який переміщується, та рухомих ланок МК на керовані параметри швидкості \dot{x} та прискорення \ddot{x} точки підвісу.

У подальшому розглядається елементарний такт переміщення. Вантаж зі стану спокою на вертикальному канатному підвісі переміщується МК на деяку задану відстань за певний термін часу. Після переміщення (у момент часу τ_p – тривалість розгону) вантаж також знаходиться у стані, близькому до стану спокою ($\ddot{x}|_{t=\tau_p} = 0; q|_{t=\tau_p} = 0; \dot{q}|_{t=\tau_p} = 0$), тобто у стані відсутності залишкових коливань. Отже, у даній задачі присутні термінальні умови як для $x(t)$, так і для $q(t)$.

У даному дослідженні використана математична модель плоского маятника для малих кутів відхилення вантажного канату ($\sin q \approx q, \cos q \approx 1$) задля отримання аналітичних виразів $x(t), q(t)$, що задовольняють певним критеріям якості руху системи «вантажний візок – канат – вантаж» МК. Тому після лінеаризації диференціальне рівняння другого порядку для вказаного вище плоского маятника приймає наступний вид [21-24]:

$$\ddot{q} + \ddot{x}/L + (2b/m) \cdot \dot{q} + g \cdot q/L = 0. \quad (2)$$

2. *Оптимізація режиму руху системи «вантажний візок – канат – вантаж» мостового крану у період його розгону $t \in [0, \tau_p]$*

З рівняння (2) легко визначити наступне співвідношення:

$$\ddot{x} = -L \cdot (\ddot{q} + 2b\dot{q}/m + g \cdot q/L). \quad (3)$$

Встановимо умови, за яких у період розгону системи ($t \in [0, \tau_p]$) виконується наступний критерій якості цього руху:

$$I = \left\{ \frac{1}{\tau_p} \cdot \int_0^{\tau_p} (\ddot{x})^2 dt \right\}^{1/2} \Rightarrow \min, \quad (4)$$

тобто мінімізація інерційних сил, діючих у даній системі у період її розгону. Необхідною умовою реалізації критерію (4) є рівняння Ейлера-Пуассона:

$$x^{(IV)} = 0. \quad (5)$$

Розв'язок рівняння (5) шукаємо у наступному виді:

$$x(t) = A_0 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2 + A_3 \cdot t^3. \quad (6)$$

Для знаходження невідомих констант A_0, A_1, A_2, A_3 використаємо наступні термінальні умови:

$$x|_{t=0} = 0; \dot{x}|_{t=0} = 0; \ddot{x}|_{t=0} = a; \ddot{x}|_{t=\tau_p} = 0, \quad (7)$$

де: a – прискорення на початку розгону вантажного візка МК. Підставляючи (6) у всі умови (7), матимемо:

$$A_0 = 0; A_1 = 0; A_2 = a/2; A_3 = -a/(6\tau_p). \quad (8)$$

Тому вираз (6) набуває вигляду:

$$x(t) = \frac{a}{2} \cdot t^2 - \frac{a}{6\tau_p} \cdot t^3. \quad (9)$$

У подальшому, для аналізу закону руху канату з вантажем $q(t)$ знаходимо:

$$\ddot{x}(t) = -a/\tau_p. \quad (10)$$

Використовуючи рівняння (2), визначимо величину $q(t)$ для довільного моменту часу $t \in [0, \tau_p]$:

$$q = \frac{L}{g} \cdot \left\{ \ddot{x} \cdot L^{-1} - \ddot{q} - 2b\dot{q}/m \right\}. \quad (11)$$

Визначимо, за відомого закону $x(t)$ (9), за яких умов для $q(t)$ виконується наступний критерій якості руху системи:

$$I_1 = \left\{ \frac{1}{\tau_p} \cdot \int_0^{\tau_p} q^2(t) dt \right\}^{1/2} \Rightarrow \min, \quad (12)$$

тобто середнє квадратичне відхилення кута $q(t)$ від гравітаційної вертикалі за період розгону вантажного візка за законом (9) набуває мінімальних значень.

Задля реалізації критерію якості руху I_1 (12) необхідною умовою є рівняння Ейлера-Пуассона (причому $x(t)$ задана функція часу – (9)):

$$q^{(IV)} - (4b^2/m^2) \cdot \ddot{q} = -(2b \cdot a)/(mL \cdot \tau_p). \quad (13)$$

Характеристичне рівняння для (13) з правою частиною, яка дорівнює нулю (тобто для однорідного рівняння, яке випливає з (13)) набуває виду:

$$\lambda^4 - (4b^2)/(m^2) \cdot \lambda^2 = 0. \quad (14)$$

Отже, корені (14) набувають наступних значень:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = 0; \lambda_3 = 2b/m; \lambda_4 = -2b/m. \quad (15)$$

Частинний розв'язок (13) шукаємо у вигляді:

$$q_{\text{част.}} = B \cdot t^2. \quad (16)$$

Підставляючи (16) у (13), легко знаходимо:

$$B = (a \cdot m)/(4L \cdot b \cdot \tau_p). \quad (17)$$

Тому загальний розв'язок (13) можна подати наступним чином:

$$q(t) = C_0 + C_1 \cdot t + C_2 \cdot \exp\left\{\frac{2b}{m} \cdot t\right\} + C_3 \cdot \exp\left\{-\frac{2b}{m} \cdot t\right\} + \frac{a \cdot m \cdot t^2}{4L \cdot b \cdot \tau_p}. \quad (18)$$

Для знаходження невизначених констант C_0, C_1, C_2, C_3 використаємо наступні термінальні умови для $q(t)$:

$$q|_{t=0}; \dot{q}|_{t=0} = 0; q|_{t=\tau_p} = 0; \dot{q}|_{t=\tau_p} = 0. \quad (19)$$

Підставляючи (18) в умови (19), знаходимо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для знаходження констант C_0, C_1, C_2, C_3 наступного виду:

$$\begin{cases} C_0 + C_2 + C_3 = 0; \\ C_1 + \frac{2b}{m} \cdot C_2 - \frac{2b}{m} \cdot C_3 = 0; \\ C_0 + C_1 \cdot \tau_p + C_2 \cdot \exp\left\{\frac{2b}{m} \cdot \tau_p\right\} + C_3 \cdot \exp\left\{-\frac{2b}{m} \cdot \tau_p\right\} + \frac{a \cdot m \cdot \tau_p}{4L \cdot b} = 0; \\ C_1 + \frac{2b}{m} \cdot C_2 \cdot \exp\left\{\frac{2b}{m} \cdot \tau_p\right\} - \frac{2b}{m} \cdot C_3 \cdot \exp\left\{-\frac{2b}{m} \cdot \tau_p\right\} + \frac{a \cdot m}{2L \cdot b} = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Лінійну неоднорідну систему рівнянь (20) для знаходження коефіцієнтів C_0, C_1, C_2, C_3 легко розв'язати за допомогою стандартної процедури лінійної алгебри (правило Крамера). У результаті для коефіцієнтів C_0, C_1, C_2, C_3 у (18) матимемо:

$$\begin{cases} \Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}; a_{11} = 1; a_{21} = 0; a_{31} = 1; a_{41} = 0; a_{12} = 0; a_{22} = 1; a_{32} = \tau_p; a_{42} = 1; a_{13} = 1; \\ a_{23} = \frac{2b}{m}; a_{33} = \exp\left\{\frac{2b}{m} \cdot \tau_p\right\}; a_{43} = \left(\frac{2b}{m} \cdot \tau_p\right); a_{14} = 1; a_{24} = -\frac{2b}{m}; a_{34} = \exp\left\{-\frac{2b}{m} \cdot \tau_p\right\}; a_{44} = \left(-\frac{2b}{m}\right) \cdot \\ \cdot \exp\left\{-\frac{2b}{m} \cdot \tau_p\right\}. \\ b_1 = 0; b_2 = 0; b_3 = -\frac{am\tau_p}{4bL}; b_4 = -\frac{am}{2Lb}. \end{cases} \quad (21)$$

$$C_0 = \frac{\Delta C_0}{\Delta}; C_1 = \frac{\Delta C_1}{\Delta}; C_2 = \frac{\Delta C_2}{\Delta}; C_3 = \frac{\Delta C_3}{\Delta}, \quad (22)$$

де значення $\Delta C_0, \Delta C_1, \Delta C_2, \Delta C_3$ можна знайти зі співвідношень (23).

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_0 = \begin{vmatrix} b_1 & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ b_2 & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ b_3 & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ b_4 & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}; \Delta C_1 = \begin{vmatrix} a_{11} & b_1 & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & b_2 & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & b_3 & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & b_4 & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}; \Delta C_2 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & b_1 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & b_2 & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & b_3 & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & b_4 & a_{44} \end{vmatrix}; \\ \Delta C_3 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & b_1 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & b_2 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & b_3 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & b_4 \end{vmatrix} \end{array} \right. \quad (23)$$

Зазначимо, що знайдений аналітичний вираз для $q(t)$ зі співвідношень (18)-(23) задовольняє критеріям якості руху системи I (4) та I_1 (12) й практично елімінує залишкові некерзовані маятникові коливання вантажу на канаті МК.

5. Висновки:

1. Обґрунтована фізико-механічна та математична моделі руху системи «вантажний візок – канат – вантаж» МК (мостового крана).

2. Для вищевказаної моделі руху встановлені закони руху вантажного візка і кута відхилення від вертикалі канату з вантажем МК, які мінімізують ці відхилення від гравітаційної вертикалі, знижують небажані некерзовані залишкові маятникові коливання вантажу МК. При цьому мінімізовані й сили інерції вантажного візка, які виникають у ньому у період його розгону, при його прямованні до ustalених параметрів руху (тобто руху вантажного візка з постійною нормативною швидкістю після закінчення процесу розгону).

3. Отримані у роботі результати можуть у подальшому слугувати для уточнення і вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку кінематично-силових параметрів руху механізмів підйому і транспортування вантажів мостовими кранами, а також крановими системами інших типів, як на стадії проектування подібних складних технічних систем, так і у режимах їх реальної експлуатації.

Список використаних джерел:

1. Ridout A.J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 1989. Vol.9. No. 1/2. P. 17-26.
2. Omar H.M. Control of gantry and tower cranes: PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003. 100 p.
3. Korytov M., Shcherbakov V., Volf E. Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes. *International Journal of Mechanics and Control*. 2015. Vol. 16. No. 2. P. 3-8.
4. Shcherbakov V., etc. The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory site. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 811. P. 99-103.
5. Shcherbakov V., etc. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 701-702. P. 715-720.
6. Kim Y.S., etc. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes. *Industry Applications Conference*. 2003. Vol. 1. P. 262-269.
7. Blackburn D., etc. Command Shaping for Non-linear Crane Dynamics. *Journal of Vibration and Control*. 2010. No.16. P. 477-501.
8. Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of filtering methods for reducing residual vibration. *European Journal of Control*. 1999. No. 5. P. 208-218.
9. Reshmin S.A., Chernous'ko F.L. A time-optimal control synthesis for a nonlinear pendulum. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2007. Vol. 46. No.1. P. 9-18.

10. Almuzara G.J.L., Flugge-Lots I. Minimum time control of a nonlinear system. *Journal of Differential Equations*. 1968. Vol. 4. No.1. P. 12-39.
11. Ловейкін В.С., Ромасевич Ю.О., Човнюк Ю.В., Кадикало І.О. Динаміка й оптимізація підйомно-транспортних машин. К.: ЦП «Компрінт», 2019. 292 с.
12. Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г., Пастушенко С.І. Моделювання динаміки механізмів вантажопідйомних машин. К. Миколаїв: РВВ МДАУ, 2004. 286 с.
13. Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Ромасевич Ю.О. Застосування методів варіаційного числення в задачах оптимального управління вантажопідйомними машинами сільськогосподарського призначення. *Підйомно-транспортна техніка*. 2010. № 2. С. 3-15.

References:

1. Ridout A.J. Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback. *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 1989. Vol.9. No. 1/2. P. 17-26. {in English}
2. Omar H.M. Control of gantry and tower cranes: PhD Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 2003. 100 p. {in English}
3. Korytov M., Shcherbakov V., Volf E. Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes. *International Journal of Mechanics and Control*. 2015. Vol. 16. No. 2. P. 3-8. {in English}
4. Shcherbakov V., etc. The reduction of errors of bridge crane loads movements by means of optimization of the spatial trajectory site. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 811. P. 99-103. {in English}
5. Shcherbakov V., etc. Mathematical modeling of process moving cargo by overhead crane. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vols. 701-702. P. 715-720. {in English}
6. Kim Y.S., etc. A new vision-sensorless anti-sway control system for container cranes. *Industry Applications Conference*. 2003. Vol. 1. P. 262-269. {in English}
7. Blackburn D., etc. Command Shaping for Non-linear Crane Dynamics. *Journal of Vibration and Control*. 2010. No.16. P. 477-501. {in English}
8. Singer N., Singhose W., Seering W. Comparison of filtering methods for reducing residual vibration. *European Journal of Control*. 1999. No. 5. P. 208-218. {in English}
9. Reshmin S.A., Chernousko F.L. A time-optimal control synthesis for a nonlinear pendulum. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2007. Vol. 46. No.1. P. 9-18. {in English}
10. Almuzara G.J.L., Flugge-Lots I. Minimum time control of a nonlinear system. *Journal of Differential Equations*. 1968. Vol. 4. No.1. P. 12-39. {in English}
11. Loveikin V.S., Romasevych Yu.O., Chovniuk Yu.V., Kadykalo I.O. *Dynamika y optymizatsiia pidiomno-transportnykh mashyn*. K.: TsP «Komprint», 2019. 292 s. {in Ukrainian}
12. Loveikin V.S., Chovniuk Yu.V., Dikteruk M.H., Pastushenko S.I. *Modeliuvannia dynamiky mekhanizmv vantazhopidiomnykh mashyn*. K.-Mykolaiv: RVV MDAU, 2004. 286 s. {in Ukrainian}
13. Loveikin V.S., Chovniuk Yu.V., Romasevych Yu.O. *Zastosuvannia metodiv variatsiinoho chyslennia v zadachakh optymalnoho upravlinnia vantazhopidiomnymy mashynamy silskohospodarskoho pryznachennia*. *Pidiomno-transportna tekhnika*. 2010. № 2. S. 3-15. {in Ukrainian}

Технологія захисту навколишнього середовища

УДК 621.4

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0308>

Олена Волошкіна,

доктор технічних наук,
професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3671-4449>
E-mail: e.voloshki@gmail.com

Данііл Маршалл,

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2984-3979>
E-mail: daniil.marshall@icloud.com

Юлія Березницька,

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
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7953-3974>
E-mail: bereznytska.iuo@knuba.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СОРБЦІЇ ІОНІВ МІДІ ПРИРОДНИМИ ГЛИНИСТИМИ МАТЕРІАЛАМИ ДЛЯ ЗАХИСТУ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОДОНОСНИХ ГОРИЗОНТІВ

АНОТАЦІЯ. Експериментальні дослідження з білою глиною з трьох родовищ Миколаївської та червоною з Черкаської області щодо сорбційних властивостей по відношенню іонів Cu^{2+} підтвердили здатність до застосування в процесах очищення від забруднень у водному середовищі місцевих природних матеріалів. Порівняний аналіз зразків червоної глини та білої, показав, що червона глина має більшу сорбційну здатність. Експеримент виконано для двох стадій фільтрації – крапельної та підпертої, які мають місце при роботі меліоративних споруд та споруд очищення. Для стадії підпертої фільтрації, проведені авторами дослідження показали зниження сорбційної спроможності всіх зразків, що відповідно було також підтверджено розрахунками адсорбційних констант Фрейндліха, якими кількісно характеризували процес адсорбції для кожного зразка, а також збільшенням усереднених коефіцієнтів фільтрації на стадії підпертої фільтрації.

Експериментальні дослідження вилучення іонів важких металів на прикладі Cu^{2+} проводилися згідно стандартної методики колометричним методом з реактивом діетилдітіокарбамату при умові початкової концентрації Cu^{2+} в розчині $5,8 \text{ мг/дм}^3$.

Результати проведеного експерименту свідчать, що при облаштуванні екранованих споруд глинистим екраном, крім протифільтраційних властивостей облицювання, що залежать від його товщини, отриманої щільності та інших параметрів після укладки, слід враховувати сорбційні властивості такого облицювання, режиму роботи споруди і, відповідно, величину гідравлічного напору.

Результати, які були отримані при проведенні даного експерименту можуть бути застосовані також при облаштуванні протифільтраційних екранів відстійників та хвостосховищ різного роду, а також при санації водних об'єктів з метою попередження забруднення підземного водонасного горизонту.

Ключові слова: глинисті матеріали, процес сорбції, підземні води, іони, важкі метали, відстійник, дренажний канал.

RESEARCH OF PROCESSES OF SORPTION OF COPPER IONS BETWEEN NATURAL CLAY MATERIALS FOR PROTECTION AGAINST POLLUTION OF UNDERGROUND AQUIFER HORIZONS

ABSTRACT. *Experimental experiments with white clay from three deposits of Mykolaiv and red clay from Cherkasy region regarding sorption properties in relation to Cu^{2+} ions confirmed the ability to use local natural materials in the processes of cleaning from pollution in the water environment. A comparative analysis of red and white clay samples showed that red clay has a greater sorption capacity. The experiment was performed for two stages of filtration - drip and suspended, which take place during the operation of reclamation facilities and treatment facilities. For the stage of supported filtration, the experiments conducted by the authors showed a decrease in the sorption capacity of all samples, which was also confirmed by the calculations of Freundlich adsorption constants, which quantitatively characterized the adsorption process for each sample, as well as an increase in the averaged filtration coefficients at the stage of supported filtration.*

Experimental studies on the extraction of heavy metal ions using Cu^{2+} as an example were carried out according to the standard method using the colometric method with the diethyldithiocarbamate reagent under the condition of an initial concentration of Cu^{2+} in the solution of 5.8 mg/dm³.

Результати проведеного експерименту свідчать, що при облаштуванні екранованих споруд глинистим екраном, крім протифільтраційних властивостей облицювання, що залежать від його товщини, отриманої щільності та інших параметрів після укладки, слід враховувати сорбційні властивості такого облицювання, режиму роботи споруди і, відповідно, величину гідравлічного напору.

The results obtained during this experiment can also be used in the installation of anti-filtration screens of settling tanks and tailings of various kinds, as well as in the sanitation of water bodies in order to prevent pollution of the underground aquifer.

Keywords: *clay materials, sorption process, groundwater, ions, heavy metals, settling tank, drainage channel.*

1. Постановка проблеми. В якості протифільтраційного покриття промислових шламонакопичувачів різного роду, ставків-відстійників, відкритих меліоративних каналів та інших захисних споруд, досить широко використовуються екрани з місцевих глинистих матеріалів. Застосування місцевих природних матеріалів при відновленні пошкоджених споруд внаслідок воєнних дій можна також розглядати для часткового видалення забруднень важкими металами із дренажних вод та їх очищення з метою подальшого використання підземних горизонтів для місцевих потреб інших водоспоживачів.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процеси сорбції в природних глинистих матеріалах та швидкість їх насичення важкими металами різними методиками досліджувалася багатьма вітчизняними та закордонними авторами [1-8 та ін.]. В даних дослідженнях використовувався місцевий каолінит, як недорогий адсорбент для видалення іонів важких металів, в тому числі і іонів міді, з розчину. Попередній аналіз якості водних об'єктів України, зокрема тих, що використовуються для подачі води на зрошення, показує, що в сучасних умовах вони містять забруднення важкими металами, зокрема іонами міді, вище гранично допустимих норм.

Використання природних глинистих покладів обґрунтовано їх сорбційними властивостями та поширеністю у тих регіонах України, які потребують відновлення зрошувальних систем та захисту відстійників і шламонакопичувачів від великих фільтраційних втрат. На відміну від вивчення основних фізико-хімічних властивостей глин, сорбційна їх здатність в залежності від їх територіального розташування розглядалася досить обмежено, тому даний напрямок досліджень має значні наукові та прикладні перспективи [9–15].

3. Мета даної роботи. Дослідження сорбційних властивостей природних глинистих матеріалів по відношенню до іонів міді для подальшого їх використання в якості протифільтраційного покриття зруйнованих відстійників та магістральних відкритих каналів меліоративних систем півдня України.

Застосування природних місцевих матеріалів на перших стадіях відновлення пошкоджених споруд може бути ефективним рішенням для часткового видалення забруднень важкими металами із підземних вод та використання водних ресурсів для потреб інших водоспоживачів регіону, який розглядається.

4. Матеріали та методика досліджень.

Експериментальні дослідження вилучення іонів важких металів на прикладі Cu^{2+} проводилися згідно методики ДСТУ 7525 2014 на ліцензійному обладнанні при використанні отриманого колибрувального графіку. Для проведення експерименту було використано фотоелектроколориметр КФК-2. Методика експерименту по іонам міді встановлює колометричні методи визначення масової концентрації міді від 0,02 до 0,5 мг/дм³ з реактивом діетилдітіокарбамату.

Для досліджень були взято проби природних глинистих матеріалів з двох родовищ Миколаївської області з координатами 48.0672884, 30.9321554 - Першотравневе та 47.7017994, 31.4392297 Актово. Для порівняння сорбційних властивостей різних видів природних глинистих матеріалів та з метою улаштування протифільтраційних екранів в інших областях України було взято червону глину с. Яблунівка Канівського району Черкаської області.

На рис.1 представлений загальний вигляд дослідних зразків, які підготовлені для проведення досліду.



Рис. 1. Вигляд зразків глинистого матеріалу з різних родовищ
Fig. 1. View of samples of clay material from different deposits

Результати лабораторних досліджень для трьох проб для природних глинистих матеріалів були отримані в колонках внутрішнього діаметру 50мм. При проведенні експерименту не враховувалися величини внутрішнього тертя в колонках, виходячи з того, що вони мають незначний вплив на швидкість фільтрації. Об'єм завантаження глинистого матеріалу в кожену колонку становив 294,38 см³, об'єм рідкої фази - 412,12 см³ (рис.2).

Приготування основного стандартного розчину сірчанокислої міді відбувалося відповідно до стандартної методики: 0,393г сірчанокислої міді $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ розчиняли в мірній колбі місткістю 1дм³ в невеликій кількості дистильованої води, яка підкислена 1см³

сірчаної кислоти, що розбавлена 1:5. Об'єм розчину доводили до відмітки дистильованою водою. 1 см³ розчину містить 0,1 мг Cu²⁺. При об'ємі досліджуваної води 50 см³ мідь визначається в концентрації від 0,02 до 0,5 мг/дм³.

В колориметричний циліндр з відміткою 50 см³ відміряли 50 см³ розчину, послідовно додаючи 1 см³ розчину сегнетової солі, 5 см³ розчину аміаку, 1 см³ розчину крохмалю і 5 см³ розчину діетилдітіокарбамату натрію. Інтенсивність отриманого забарвлення вимірювалося візуально та фотометрично з використанням шкали стандартних розчинів. У випадку значення кольоровості більше 20°, воду знебарвлювали надсерчаноокислим амонієм.

Для побудови градувального графіку використовували оптичні щільності забарвлених стандартних розчинів.



Рис.2. Експериментальні колонки з глинистими зразками перед проведенням дослідів
 Fig. 2. Experimental columns with clay samples before the experiment

Лабораторні досліді проводилися для двох режимів фільтрації під екранованою спорудою – режима крапельної фільтрації, або з зоною неповного насичення ґрунтів під спорудою, і режимом підпертої фільтрації. В результаті проведення експерименту до сімнадцятої доби моделювалися умови краплинної фільтрації, з 17 доби відбувалося моделювання умов підпертої фільтрації. Значення Cu²⁺ в вихідному розчині становило 5,8 мг/дм³.

Як остаточний результат лабораторного аналізу бралось середньоарифметичне значення двох паралельних вимірювань, розбіжність між якими не більше 25 %. Розходження результатів здійснювалося за стандартною процедурою.

5. Результати досліджень.

На Рис.3 представлено лабораторні дані концентрацій Cu²⁺ при фільтрації через дослідні зразки в залежності від часу для умов крапельної та підпертої фільтрації: Аналізуючи отримані дані, можна констатувати наступне:

- для природних глинистих матеріалів з трьох родовищ, які досліджувалися, виявлено, що всі зразки мають сорбційні здібності та характер зміни концентрації іонів на виході однаковий при умові початкової концентрації Cu²⁺ в розчині 5,8 мг/дм³;

- для родовища Першотравневе значення рівноважної концентрації на виході для дослідного зразка при капельній фільтрації тут становило 0,45 мг/дм³, в умовах підпертої фільтрації – 1,55 мг/дм³;

- сорбційна здатність у глин з родовища Актове (Білі скелі) виявилася найменшою і рівноважна концентрація на виході для дослідного зразка становила 0,52мг/дм³ для умов краплинної фільтрації і 3,2 мг/дм³ для умов підпертої фільтрації;

- рівноважна концентрація на виході для дослідного зразка з Черкаської області становила 0,38мг/дм³ для умов краплинної фільтрації і 1,2 мг/дм³ для умов підпертої фільтрації відповідно;

- найбільшу сорбційну здатність в рівноважних умовах фільтрації виявлено для червоних глин (Яблунівка Черкаської області), тоді як два інших зразка були представлені білою глиною.

В результаті даного дослідження отримано дані щодо ефективності процесу адсорбції глинистих природних матеріалів по відношенню до іонів міді.

Адсорбцію обчислювали за формулою:

$$A = (C_0 - C) \cdot V / m, \quad (1)$$

де A – величина адсорбції, моль/г; C₀ – початкова концентрація до адсорбції, моль/дм³ ; C – рівноважна концентрація після адсорбції, моль/дм³ ; V – об'єм розчину, дм³ ; m – маса глини, г.

Результати розрахунків представлені в таблиці 1 для рівноважних концентрацій в двох режимах фільтрації.

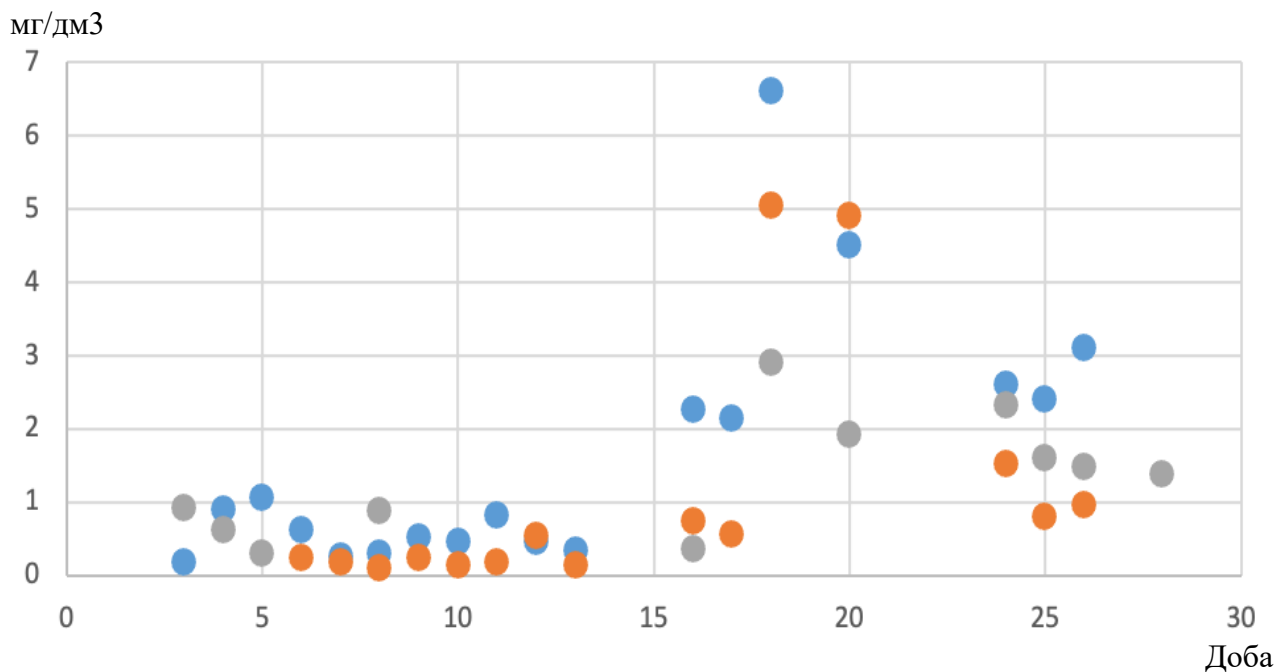


Рис. 3. Зведені дані концентрацій Cu²⁺ при фільтрації через дослідні зразки в залежності від часу (доби) та для умов крапельної та підпертої фільтрації:

маркери ● – родовище Актове Миколаївської області, маркери ● - Канівський район

Черкаської області, маркери ● – родовище Першотравневе Миколаївської області.

Fig. 3. Summary data of Cu²⁺ concentrations during filtration through test samples depending on time (days) and for the conditions of drip and suspended filtration:

markers ● – Aktove field, Mykolaiv region, markers ● - Kaniv district of Cherkasy region, markers

● – Pershotravneve field, Mykolaiv region.

Таблиця 1. Значення адсорбції зразків природних глинистих матеріалів
Table 1. Value of adsorption of samples of natural clay materials

Родовище	Рівноважна концентрація в період краплинної фільтрації, моль/дм ³	Рівноважна концентрація підпертої стадії фільтрації, моль/дм ³	Адсорбція зразка (краплинна фільтрація), моль/г	Адсорбція зразка (підперта фільтрація), моль/г
Першотравневе Миколаївська область (біла глина)	0.00708	0.02439	$6.29 \cdot 10^{-5}$	$3.87 \cdot 10^{-5}$
Актове Миколаївська область (біла глина)	0.00818	0.05035	$6,19 \cdot 10^{-5}$	$3.07 \cdot 10^{-5}$
Яблунівка Канівський район Черкаської області (червона глина)	0.00598	0.0188	$6.70 \cdot 10^{-5}$	$5.7 \cdot 10^{-5}$

Дані таблиці свідчать про те, що червоні глини (зразок з родовища Черкаської області) мають більшу адсорбційну здатність до іонів міді.

Проведене моделювання в рамках теоретичної моделі ізотерм адсорбції Фрейндліха дозволило визначити адсорбційні константи та кількісно характеризувати процес адсорбції, що протікає в кожному зразку.

Проведений аналіз показав, то найбільш відповідною для нашого експерименту для опису ізотерми адсорбції є формула Фрейндліха [16]. Константи K_F і $1/n_f$ в рівнянні Фрейндліха визначалися графічним методом за ізотермою, що побудована в логарифмічних координатах:

$$\ln q_e = \ln K_F + 1/n_f \ln C. \quad (2)$$

Тангенс кута нахилу даної прямої дорівнює $1/n_f$, а відрізок, що відсікається прямою на осі ординат, дорівнює $\ln K_F$. Значення константи K_F зазвичай знаходиться в широких межах. Показник $1/n_f$ перебуває у межах 0,1–0,5 для адсорбції з розчинів. Тому рівняння Фрейндліха придатне лише для концентрацій, менших за 0,5 моль/л.

Ізотерми адсорбції в звичайному та логарифмічному вигляді для кожного зразка глини окремо для кожної з двох стадій фільтрації (крапельній та підпертої) були побудовані. Ізотерма адсорбції в звичайному вигляді побудована в координатах q_e , моль/г, по осі ординат та по осі абсцис – значення залишкової концентрації іонів міді C_e в розчині після адсорбції, мг/дм³. Результати вимірів представлені в табл.2.

Таблиця 2. Результати вимірів коефіцієнтів адсорбції іонів Cu^{2+} в рівнянні Фрейндліха на глинистих зразках

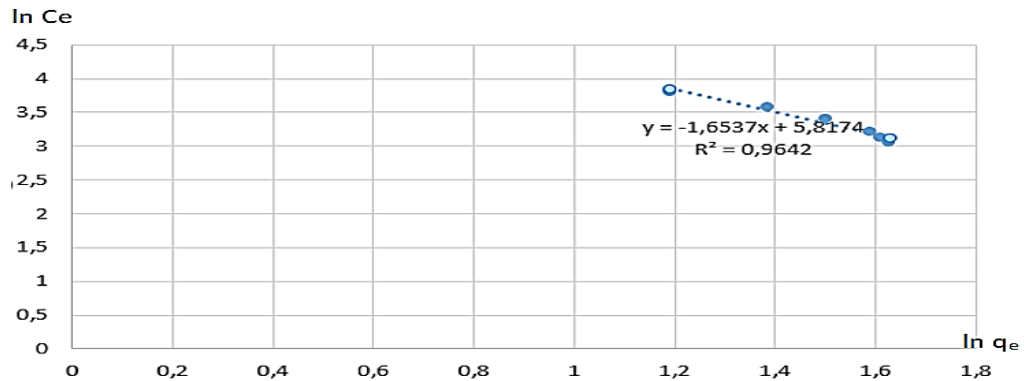
Table 2. The results of measuring the adsorption coefficients of Cu^{2+} ions in the Freundlich equation on clay samples

Назва досліджуваного зразка	K_F (крапельна стадія фільтрації/підперта)	$1/n_f$ крапельна стадія фільтрації/підперта)
Першотравневе Миколаївської області (біла глина)	$0,43 \cdot 10^{-5}/3,6 \cdot 10^{-5}$	0,5/0,66
Актове Миколаївської області (біла глина)	$0,61 \cdot 10^{-5}/15,9 \cdot 10^{-5}$	0,41/10
Канівський район Черкаської області, Яблунівка (червона глина)	$2,9 \cdot 10^{-5}/13,0 \cdot 10^{-5}$	0,06/0,25

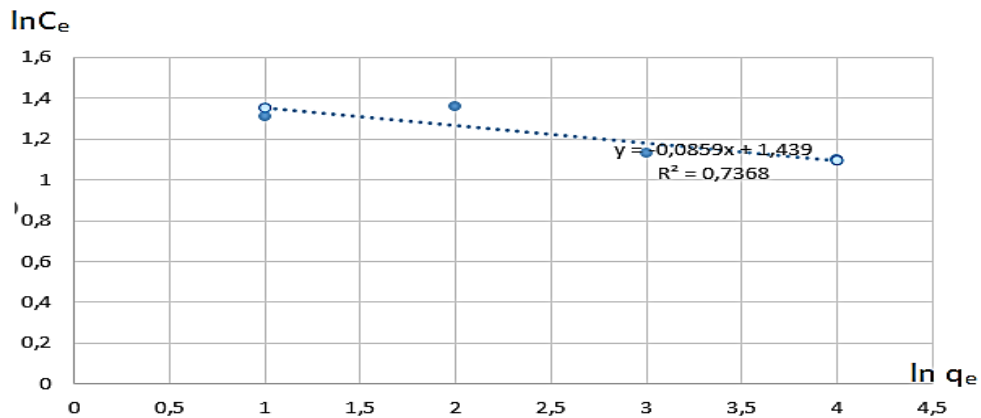
На рис.4 представлено графіки адсорбції глинистих зразків в логарифмічному вигляді в умовах підпертої фільтрації.

Як видно з проведеного експерименту, значення сорбційної здатності червоної глини більше порівняно з білою з родовищ Миколаївської області.

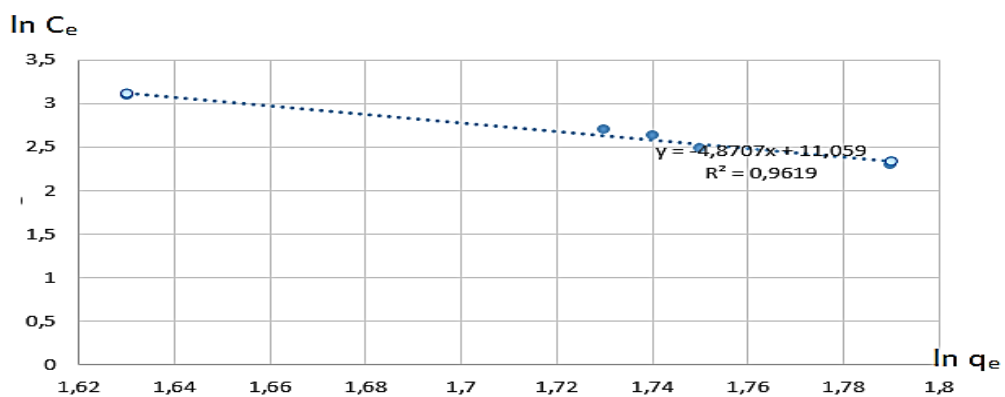
Усереднені значення вимірів коефіцієнтів фільтрації глинистих трьох зразків в часі в залежності від стадій фільтрації, демонструють також збільшення коефіцієнта фільтрації зразків в умовах підпертої фільтрації порівняно з крапельною.



A)



B)



C)

Рис. 4. Ізотерми адсорбції глинистих зразків в логарифмічному вигляді в умовах підпертої фільтрації: А) – з родовища Першотравневе Миколаївської області; В) - з родовища Актове Миколаївської області; С) - з Канівського району Черкаської області

Fig. 4. Adsorption isotherms of clay samples in logarithmic form under conditions of supported filtration: А) – from the Pershotravneve deposit, Mykolaiv region; В) - from the Aktove deposit of the Mykolaiv region; С) - from Kaniv district of Cherkasy region

6. Висновки:

Результати проведеного експерименту свідчать, що при облаштуванні екранованих споруд глинистим екраном, крім протифільтраційних властивостей облицювання, що залежать від його товщини, отриманої щільності та інших параметрів після укладки, слід враховувати сорбційні властивості такого облицювання, режиму роботи споруди і, відповідно, величину гідравлічного напору. На першій стадії проектування необхідно встановлення теоретичних та експериментальних залежностей між цими величинами після конкретизації міста реконструкції, місця родовища природного матеріалу, його адсорбційної здатності, яка може бути обумовлена як дисперсністю так і хімічною будовою природного матеріалу.

Список використаних джерел

1. M.W. Amer, F.L. Khalili, A.M. Awwad. Adsorption of lead, zinc and cadmium ions on polyphosphate modified kaolinite clay. *Journal of Environmental Chemistry and Ecotoxicology* Vol. 2(1) pp. 001-008, February, 2010 Available online at <http://www.academicjournals.org/jece>
2. F.A. Dawodu, G.K. Akpomie Simultaneous adsorption of Ni(II) and Mn(II) ions from aqueous solution onto a Nigerian kaolinite clay *J Mater Res Technol*, 3 (2) (2014), pp. 129-141. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.03.002>
3. Y. Li, B. Xia, Q. Zhao, F. Liu, P. Zhang, Q. Du, et al. Removal of copper ions from aqueous solution by calcium alginate immobilized kaolin *Letters in Applied Microbiology*, Volume 59, Issue 4, 1 October 2014, Pages 404–411, <https://doi.org/10.1111/lam.12293>
4. Трач Ю. Сорбція іонів Mn²⁺ природними немодіфікованими матеріалами: ізотерми сорбції, нелінійний метод. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. 2020. № 1 (89) С. 62–73.
5. Сакалова Г. В., Василінич Т. М. Дослідження ефективності очищення стічних вод від іонів важких металів з використанням природних адсорбентів : монографія. Вінниця: ВДПУ ім. Михайла Коцюбинського, 2019. 92 с.
6. Kovo G. Akpomie, Folasegun A. Dawodu. Potential of a low-cost bentonite for heavy metal abstraction from binary component system. Beni-Suef University. *Journal of Basic and Applied Sciences*. 2015. Vol. 4, issue 1. Pp. 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2015.02.002>.
7. О. М. Хоменко, О. В. Єгорова, О. О. Мислюк. АНАЛІЗ СОРБЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ПРИРОДНИХ СОРБЕНТІВ ПО ВІДНОШЕННЮ ДО ВОДНИХ РОЗЧИНІВ СПОЛУК ВАЖКИХ МЕТАЛІВ *Ukrainian hydrometeorological journal*, 2021, 28, 111-119 doi: 10.31481/uhmj.28.2021.10
8. Trach Y., Chernyshev D., Biedunkova O., Trach R., Statnik I. Modeling of Water Quality in West Ukrainian Rivers Based on Fluctuating Asymmetry of the Fish Population, *Water*, 2022, vol. 14, nr 21, s.1-20. ISSN 2073-4441. <https://doi.org/10.3390/w14213511>
9. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б. та ін. Будівельне матеріалознавство. 3-тє вид. перероб. та допов. Київ : Ліра-К, 2015. 624 с.
10. V. Popovych, A. Gapalo. *Ecol. Eng.* 22(5), 96 (2021); <https://doi.org/10.12911/22998993/135872>.
11. B. Kaźmierczak, J. Molenda, M. Swat, *Environ. Technol. Innov.* 23, 101737 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101737>.
12. Y. Yuana, Zh. An, R. Zhang, X. Wei, B. Lai. *J. Clean. Prod.* 293, 126215 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126215>.
13. E. Cerrahoğlu Kaçakgil, S. Çetintaş. *Sustain. Chem. Pharm.* 22, 100468 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100468>.
14. R. Jayasree et al., *Chemosphere* 285, 131502 (2021); <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131502>.
15. A. Kontsur, Yu. Rudyk, L. Sysa, Ya. Kyryliv, *Ecological Safety* 25, 38 (2018); <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.38-45>.
16. A. Kontsur, L. Sysa, M. Petrova, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 6, 26 (2017); <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.116090>.

УДК 504.06

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0309>**Назарій Негода**

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища і охорони праці
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0082-6027>E-mail: uaror-korduba@ukr.net**ВПЛИВ УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА НА СТАН ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ**

АНОТАЦІЯ. Науково-технічний прогрес сучасного суспільства – об'єктивні процеси, які неможливо зупинити. Наразі міста займають близько 0,3% площі земної поверхні, але в них сконцентровано більше 40% населення. Великі міста розширюють свої функціональні властивості та стають стимуляторами зростання нових виробництв, інтеграції та фокусування господарської діяльності людини. Зосереджені на одній території сучасного міста великої кількості техніки, будівель, населення призвело до того, що урбанізоване середовище за якісними показниками суттєво відрізняється від природного. В умовах функціонування великих міст людина деформує середовище існування та гостро відчуває наслідки деформації на собі.

Розгляд екологічних проблем із сучасних позицій дозволяє стверджувати, що погіршення навколишнього природного середовища не є неминучим і не обов'язково супроводжує господарську діяльність людини. Водночас наголошуються на відсутності єдності методологічних підходів до виявлення екологічно обумовлених захворювань, протиріччя в оцінці ролі факторів навколишнього середовища, недостатня розробленість критеріїв ідентифікації екологічно обумовленої патології, недосконалість системи оцінки та управління екологічним ризиком, необхідність наукового обґрунтування системи правової та економічної компенсації шкоди здоров'ю, пов'язаного із впливом факторів навколишнього середовища.

Процес урбанізації та пов'язані з ним якісні характеристики ефективно можуть розглядатись лише при вивченні системи «людина – суспільство – навколишнє середовище». Найважливішою задачею дослідження вище згаданої системи є дослідження безперервного процесу урбанізації та збільшення антропогенного впливу на навколишнє середовище та здоров'я населення. В даних умовах важливо розуміти послідовність та особливості процесу урбанізації, вивчити вплив змін кліматичних факторів, розвиток антропогенних факторів, їх вплив на навколишнє середовище та здоров'я населення.

В роботі розглядаються основні гігієнічні та екологічні проблеми пов'язані з процесом урбанізації та зміною клімату, запропоновані комплексні заходи попередження та зниження негативних наслідків для населення. Продемонстровано, що управління процесами формування урбанізованого середовища є важливою складовою життєдіяльності міст та основною задачею забезпечення комфортних умов проживання населення.

Ключові слова: урбанізація, зміна клімату, навколишнє середовище, антропогенні фактори, умови життєдіяльності.

THE IMPACT OF THE URBANIZED ENVIRONMENT ON PUBLIC HEALTH

ABSTRACT. The scientific and technological progress of modern society is an objective process that cannot be stopped. Currently, cities occupy about 0.3% of the earth's surface area, but they are home to more than 40% of the population. Large cities are expanding their functional properties and becoming stimulators of the growth of new industries, integration and focus of human economic activity. The concentration of a large number of equipment, buildings, and population in one area of a modern city has led to the fact that the urbanized environment is significantly different from the natural environment in terms of quality. In the context of large cities, humans deform the environment and feel the consequences of deformation acutely.

Consideration of environmental problems from a modern perspective allows us to assert that environmental degradation is not inevitable and does not necessarily accompany human economic activity. At the same time, the author emphasizes the lack of unity of methodological approaches to the identification of environmentally caused diseases, contradictions in assessing the role of environmental factors, insufficient

development of criteria for identifying environmentally caused pathology, imperfection of the system of environmental risk assessment and management, and the need for scientific substantiation of the system of legal and economic compensation for health damage associated with the impact of environmental factors.

The process of urbanization and its related qualitative characteristics can be effectively considered only when studying the human-society-environment system. The most important task of studying the aforementioned system is to investigate the continuous process of urbanization and the increasing anthropogenic impact on the environment and public health. In these conditions, it is important to understand the sequence and features of the urbanization process, to study the impact of climate change, the development of anthropogenic factors, their impact on the environment and public health.

The paper discusses the main hygienic and environmental problems associated with the process of urbanization and climate change, and proposes comprehensive measures to prevent and reduce the negative consequences for the population. It is demonstrated that the management of the processes of formation of the urbanized environment is an important component of urban life and the main task of ensuring comfortable living conditions for the population.

Keywords: *urbanization, climate change, environment, anthropogenic factors, living conditions.*

1. Постановка проблеми. Однією з сучасних тенденцій розвитку суспільства є процес урбанізації. Будівлі, споруди мають прямий та непрямий вплив на навколишнє середовище. Під час будівництва, експлуатації, реконструкції будівель використовуються природні ресурси, утворюються відходи, виділяються шкідливі речовини в навколишнє середовище. Потреби у використанні ресурсів суттєво перевищують процес їх поновлення. В результаті чого неминує виникає виснаження природного потенціалу та дефіцит ресурсів, забруднення водних ресурсів, ґрунтів, повітряного басейну та ін.

Вирішення питань, пов'язаних зі зміною клімату потребує комплексного підходу та сумісного вирішення як розвинених країн, так і тих, які тільки розвиваються. Комплексний підхід передбачає оцінку, планування та реалізацію відповідних технологій, інноваційних ефективних методів щодо пом'якшення наслідків змін клімату, адаптації господарських секторів, зменшення негативного антропогенного впливу.

2. Мета роботи. Проаналізувати основні гігієнічні та екологічні проблеми пов'язані з процесом урбанізації та зміною клімату та запропонувати комплексні заходи попередження та зниження негативних їх наслідків для населення.

3. Матеріали та методи. Частка викидів парникових газів будівельної галузі в глобальному масштабі становить близько однієї третини від загальної кількості, що робить їх одним найбільших джерел викидів. Основною причиною такого високого показника викидів парникових газів є широке використання для виготовлення будівельних матеріалів та забезпечення комфортних мікрокліматичних умов в будівлях енергії, яка отримана на основі використання природних ресурсів, освітлення, підігрівання води, використання електроприладів.

В середньому людина проводить до 90% часу в будівлі. Тому для будівельної сфери є важливим вирішення питання скорочення викиду парникових газів. Пом'якшення наслідків змін клімату в будівельній галузі передбачає широкі можливості для розвитку екологічно орієнтованої економіки та створення сучасних, екологічно чистих будівель.

Зменшення наслідків викидів парникових газів в будівельній галузі потребує використання інтегрованих інноваційних рішень, використання сучасних технологій зменшення негативних наслідків зміни клімату, технологій рециклінгу.

Виділяють три основні сфери впливу будівель на населення:

- Соціальний. Будівлі мають суттєвий вплив на здоров'я людей, які в них проживають, якість життя, їх сприйняття та взаємодію навколишнім середовищем. Низька якість житлового фонду пов'язана з неефективною роботою систем опалення та вентиляції, що в результаті може викликати захворювання дихальної системи.

- Економічний. Протягом останнього десятиліття спостерігається суттєва урбанізація територій та збільшення міського населення, що забезпечує до 15% зайнятості. Дослідження UNEP SBCI свідчать, що при ефективному проектуванні будівель та використанні екологічно безпечних технологій, збільшується ефективність праці.

- Екологічний. Будівельна галузь є одним з найбільших джерел викиду парникових газів та за оцінками ЮНЕП частка викидів складає третину від загальної кількості. Також, будівельна галузь використовує велику кількість матеріалів у вигляді природних ресурсів. В зв'язку із швидкими темпами урбанізації та зростанням кількості міст, будівництво нових будівель та споруд призводить до втрати ґрунтового покриву, зменшення біорізноманіття. Утворення відходів призводить до забруднення навколишнього середовища та загрожують здоров'ю населення.

Окрім фізичних ризиків, які виникають внаслідок кліматичних змін, деякі міста можуть зіштовхнутися з рядом складнощів щодо надання базових послуг своїм жителям. Ці зміни вплинуть на водопостачання, матеріальну інфраструктуру, транспорт, товари та послуги урбоєкосистеми, енергоспоживання та сферу виробництва.

Ефективне управління процесами урбанізації в сучасних умовах пов'язано з урахуванням ряду вимог, серед яких:

- теоретичне вивчення питання, прогноз та пошук альтернативних рішень;
- розвиток урбанізованої території з урахуванням гігієнічних норм, економічних та соціальних аспектів;
- комплексний підхід повинен стати основою для вирішення будівельних задач.

Відповідно до сучасного уявлення, якість навколишнього середовища проявляється опосередковано через стан здоров'я мешканців міст, що в свою чергу дозволяє вважати його інтегральним показником якості стану навколишнього середовища. Особливо антропогенно навантажене навколишнє середовище в містах з населенням, яке перевищує 250 тисяч жителів. Саме такі міста особливо швидко розвиваються.

Важливою проблемою є оцінка ролі впливу антропогенно трансформованого урбанізованого середовища на його вплив на здоров'я та життєдіяльність населення. В більшості випадків урбанізоване середовище є безпосередньою причиною збільшення ризику виникнення захворювань, а саме порушення екологічної рівноваги водно-ґрунтового балансу та погіршення параметрів мікроклімату забудови.

Гігієнічний підхід до оцінки урбанізованого середовища ґрунтується на двох основних постулатах: комплексна характеристика урбанізованого середовища; оцінка стану здоров'я населення та параметрів середовища. Таким чином основним напрямком досліджень урбоєкосистем передбачає визначення впливу соціальних умов на природне середовище та умови проживання населення.

Житловий фонд безперервно розвивається, природа якого дозволяє пов'язати міський простір з соціальними та гігієнічними показниками. Основним критерієм оцінки міського середовища є ступінь його відповідності потребам населення. Доцільно запропонувати гігієнічний критерій міського середовища, який дозволить створити таке середовище, яке дозволить максимально швидко адаптуватись та позитивно впливати на стан здоров'я населення.

Перспективи розвитку міських територій та житлових районів визначається рядом параметрів, серед яких демографічні прогнози та інтенсивністю процесів урбанізації. З іншого боку недостатня кількість територій для забудови призводить до збільшення кількості поверховості будівель та щільності розташування. Така тенденція пов'язана із збільшенням тривалості життя населення та визначають необхідність збільшення розмірів прибудинкової території.

Встановлено, що збільшення щільності забудови та заселення (з 300-400 чол/га до 500 чол/га) сприяє збільшенню загальної (в 1,2-1,5 рази) та дитячої інфекційної (в 1,5-2,0 рази) захворюваності.

Повноцінна гігієнічна оцінка урбоєкосистеми є досить складною задачею, тому важливо сформулювати модель дослідження причинно-наслідкової залежності впливу антропогенних та кліматичних факторів на міське середовище та здоров'я населення (рис. 1).

Сукупність всіх антропогенних впливів на навколишнє середовище в умовах великих міст веде до формування нової санітарної-гігієнічної ситуації в житловому середовищі, що вимагає всебічного вивчення та цілеспрямованих дій щодо запобігання можливим негативним наслідкам. Питання гігієни житлового середовища стають особливо актуальними, оскільки урбанізація та породжені нею проблеми до певної міри обумовлюють несприятливі зрушення у стані здоров'я населення міст.



Рис. 1. Модель дослідження причинно-наслідкової залежності впливу антропогенних та кліматичних факторів на міське середовище та здоров'я населення

Fig. 1. Research model of cause-and-effect dependence of the impact of anthropogenic and climatic factors on the urban environment and population health

Основними несприятливими чинниками міського середовища, що негативно впливають на здоров'я та самопочуття людини, є:

- негативні фізичні та хімічні фактори навколишнього середовища;
- низька якість житла, тіснота та висока щільність заселення;
- надмірно швидкий темп життя (тиск тимчасового фактора);
- підвищена частота соціальних контактів;
- вплив побутових приладів та апаратури (електромагнітні випромінювання);

- вплив монотонної архітектури та денатурованого природного середовища міста на стан людини;

- утруднена досяжність зон рекреації.

Високий рівень забруднення атмосферного повітря чужорідними токсичними речовинами викликається майже виключно в ході технічного споживання енергії.

Безпосередні джерела забруднення повітря та відповідну їм у відсотках частину у загальному споживанні енергії можна загалом уявити так: опалення житла та гаряча вода — 50%; паливні та мастильні речовини для механічних видів транспорту та літаків 30%; промисловість - 20%

Встановлено, що за підвищеного рівня забруднення повітря відзначається тенденція до підвищення захворюваності та смертності; із найбільш частих захворювань, пов'язаних із забрудненням повітря, на першому місці стоять захворювання органів дихання (хронічні бронхіти, емфіземи, запалення легенів та астма), збільшується частота ракових та серцево-судинних захворювань.

4. Висновки:

Умови життя у великому місті мають сильну дію на людину, яка може призвести до розвитку захворювань. Разом з тим, знання основних діючих факторів та форм реагування та адаптації людини до цих факторів дозволяє визначити коло заходів, що підтримують здоров'я та самопочуття людей (раціональне планування, усунення тісноти житлових приміщень, збільшення житлової площі на одну особу, зниження рівня шуму та забруднення атмосфери, полегшення доступу до зон рекреації, забезпечення безпеки житла, зелені насадження, підвищення рівня фізичної активності).

Урбанізація при всіх її досягненнях принесла людям такі зміни навколишнього середовища, які у все збільшуються масштабах створюють фізіологічно несприятливі умови життя для населення міст. При цьому на передньому плані стоять: шум, забруднення повітря, змінене довкілля з обмеженими можливостями.

Навколишнє житло міське середовище має бути кардинальним чином оздоровлено та покращено за рахунок підвищення рівня благоустрою міста та його озеленення (в т. ч. прибудинкових територій), проведення радикальних заходів щодо розушільнення центрів з метою створення сприятливих умов для проживання населення не тільки в районах нової забудови на периферійних ділянках міста, а й у історичних центрах.

Реалізація моделі рис.1 дозволить суттєво знизити негативний вплив антропогенного та кліматичного впливу на здоров'я населення міст, сформувати інформаційно-аналітичні карти міських зон для оцінки еколого-гігієнічної ситуації, визначення антропогенного навантаження на населення, попередити виникнення зон з негативним впливом на стан здоров'я.

Список використаних джерел:

1. Morrone M., Tres A., Aronin R. Creating effective messages about environmental health // J. Environ Health. 2005. 68 (1). 9–14; quiz 41–42.
2. Brooks S.M., Gochfeld M. Herzstein J., ET all. Environmental medicine. Mosby Co. St. Louis., 1995. 780 pp.
3. Scherrer J.F., Xian H., Shah K.R., et al. Effect of genes, environment and lifetime co-occurring disorders on health-related quality of life in problem and pathological gamblers // Arch. Gen. Psychiatry. 2005. 6. 62. 677–683.
4. Samer M. To wards the implementation of the Green Building concept in agricultural buildings: a literature review / M. Samer // Agricultural Engineering International. – 2013.–Vol. 15. – № 2. – P. 25–46.
5. Бібік Н.В. Будівництво як інноваційний підхід до формування сталого розвитку України / Н.В. Бібік // Економіка будівництва і міського господарства економіки. – 2014. – № 1. – С. 23–29.
6. Building design and construction. White Paper on Sustainability [Electronic resource]. – Available on : <https://archive.epa.gov/greenbuilding/web/pdf/bdcwhitepaperr2.pdf>. 5
7. Зеленое строительство – это не просто актуальный тренд [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://russland.ahk.de/ru/publikacii/impuls/inhalt-impuls-2014/zelenoe-stroitelstvo/>.

8. Canada Green Building Trends: Benefits Driving the New and Retrofit Market [Electronic resource]. – Available on : <https://www.cagbc.org/cagbcdocs/resources/CaGBC%20McGraw%20Hill%20Cdn%20Market%20Study.pdf>.
9. Асаул А.Н., Иванов С.Н. Основные направления развития «зеленого» строительства. Вестник ТОГУ. 2015. № 1(36). С. 169–178.
10. Arijit Sinha, Rakesh Gupta, Andreja Kutnar. Sustainable Development and Green Buildings. *Drvna industrija*. 2013. № 64(1). P. 45–53.
11. Practical Guides for Creating Successful New Communities – Guide 8: Creating Health-Promoting Environments. TCPA. Living Draft. 2017. 36 p.
12. Norm G. Miller, Dave Pogue, Quiana D. Gough, Susan M. Davis. Green Buildings and Productivity. *The Journal of Sustainable Real Estate*. 2009. Vol. 1. № 1. P. 65–89.
13. Amanjeet Singh, Matt Syal, Sue C. Grady, Sinem Korkmaz. Effects of Green Buildings on Employee Health and Productivity. *American Journal of Public Health*. 2010. № 100(9). P. 1665–1668.
14. Протасенко О.Ф. Дослідження й аналіз показників екологічності робочого середовища. Комунальне господарство міст. 2018. Вип. 7(146). С. 127–132.

УДК 628.4.046

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0310>**Володимир Ващенко,**

доктор фізико-математичних наук,
професор Міжвідомчого наукового центру фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології НАН України, «Одеської політехніки» та Мінекології України,
просп. Шевченка 1, м. Одеса, 65044, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-2129>
E-mail: nucleoroid@gmail.com

Ірина Кордуба,

доктор технічних наук,
доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища і охорони праці,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465>
E-mail: uaror-korduba@ukr.net

Хафез Ненсі Махмуд,

аспірантка кафедри екології,
Національний авіаційний університет,
просп. Любомира Гузара 1, м. Київ, 03058, Україна,
E-mail: uaror-korduba@ukr.net

Негода Назарій

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища і охорони праці,
Київський національний університет будівництва і архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0082-6027>
E-mail : nvnegoda33@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ УСТАНОВОК ДЛЯ ПЛАЗМОХІМІЧНОГО ПІРОЛІЗУ МЕДИЧНИХ ВІДХОДІВ

АНОТАЦІЯ. У сфері поводження з відходами виділяється пріоритетний напрям - захист довкілля та здоров'я людини від негативного впливу відходів, зокрема медичних та фармацевтичних. Термін "медичні відходи" визначає повну сукупність усіх категорій та видів медичних відходів (МВ) які в Україні віднесені до класу небезпечних. Нестримне зростання кількості та темпів виробництва небезпечних МВ в умовах російсько-української війни (МВ) критично загострює екологічну ситуацію в Україні. Але існуючі методи та технологічні засоби не спроможні забезпечити їх повну екологічно безпечну переробку та утилізацію. У статті проаналізовано особливості методу спалювання медичних, фармацевтичних та лікарняних відходів. Продемонстровано, що плазмо дугові технології та технології плазмохімічного піролізу є добре перевіреними і комерційно привабливими для їх застосування в промислових масштабах і в тому числі в медичній галузі для утилізації, переробки та знищення небезпечних відходів. Спалювання медичних відходів на відкритому повітрі або в інсинераторах має температурні обмеження не більше 500 °С. В роботі, в якості високотемпературної альтернативи інсинерації медичних відходів, розглядається технологія плазмохімічного піролізу при 1100-1250 °С що реалізована у вигляді мобільної плазмопіролізної установки «Плазмон-3», розроблена та створена на базі вітчизняного плазмо генератора ПУН-1. Показано переваги застосування високотемпературного плазмохімічного піролізу, що роблять його, з точки зору екологічної безпеки поза конкурентним і на відміну від димо-виділяючих аналогів, технології плазмохімічного піролізу знищують медичні відходи не утворюючи екологічно небезпечних залишків.

Ключові слова: медичні відходи, спалювання, інсинерація, плазмохімічний піроліз, військові медичні відходи, мобільні плазмопіролізні установки, плазмогенератор.

TECHNOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL FEATURES OF PLANTS FOR PLASMA-CHEMICAL PYROLYSIS OF MEDICAL WASTE

ABSTRACT. *The protection of the environment and human health from the negative impact of waste, in particular medical and pharmaceutical waste, is a priority in the field of waste management. The term "medical waste" defines the full range of all categories and types of medical waste (MW) that are classified as hazardous in Ukraine. The unrestrained growth of the amount and rate of production of hazardous medical waste in the context of the Russian-Ukrainian war (MW) critically exacerbates the environmental situation in Ukraine. However, existing methods and technological means are not able to ensure their complete environmentally safe processing and utilization. The article analyzes the peculiarities of the method of incineration of medical, pharmaceutical and hospital waste. It is demonstrated that plasma arc technologies and plasma-chemical pyrolysis technologies are well-proven and commercially attractive for their application on an industrial scale, including in the medical field, for the disposal, recycling and destruction of hazardous waste. The incineration of medical waste in the open air or in incinerators has temperature limits of no more than 500 °C. The paper considers the technology of plasma-chemical pyrolysis at 1100-1250 °C as a high-temperature alternative to medical waste incineration, which is implemented in the form of a mobile plasma pyrolysis unit "Plazmon-3", developed and created on the basis of the domestic plasma generator PUN-1. The advantages of using high-temperature plasma-chemical pyrolysis are shown, which make it, in terms of environmental safety, beyond the competition and, unlike smoke-emitting analogues, plasma-chemical pyrolysis technologies destroy medical waste without forming environmentally hazardous residues.*

Keywords: *medical waste, burning, incineration, plasma-chemical pyrolysis, military medical waste, mobile plasma pyrolysis units, plasma generator.*

1. Постановка проблеми. В результаті нестримного зростання та широкого застосування одноразових медичних матеріалів в умовах російсько-української війни на території України об'єми та темпи виробництва небезпечних медичних відходів (МВ) критично зростають. При цьому на сьогодні усі медичні відходи в Україні віднесені до класу небезпечних а термін "медичні відходи" визначає повну сукупність усіх категорій та видів медичних відходів. Згідно з [1-2] та з іншими правовими положеннями/рекомендаціями, медичні відходи в Україні класифікують за категоріями: А – епідемічно безпечні медичні відходи; В – епідемічно небезпечні медичні відходи; С – токсикологічно небезпечні медичні відходи; Д – радіологічно небезпечні медичні відходи. Але реально існуюча технологічно недосконалість системи поводження з медичними відходами загрожує здоров'ю громадян і критично посилює екологічну кризу.

Найпоширенішим методом утилізації медичних відходів практично у всіх країнах світу є їх спалювання на відкритому повітрі або в інсинераторах. Однак, через відсутність сучасних високопродуктивних та екологічно безпечних технологій переробки та утилізації медичних відходів, до 95% МВ потрапляють на санкціоновані та несанкціоновані полігони і сміттєзвалища, створюючи при цьому важкі ризики хімічних, токсичних, медико-біологічних, канцерогенних, мутагенних, радіаційних та багатьох інших впливів на здоров'я громадян України. При цьому неправильне поводження з небезпечними МВ і їх неконтрольоване поширення може призводити до інфікування медичного персоналу та населення через ураження шкіри, органів дихання та травлення.

Багато медичних відходів можуть містити активні їдкі, канцерогенні, мутагенні, подразнювальні, сенсibiliзуючі, горючі та вибухонебезпечні властивості. При цьому морфологічний склад медичних відходів не прогнозованим чином дуже залежить від специфіки та особливостей медзакладів, що їх утворюють, та від багатьох інших факторів.

2. Аналіз екологічної небезпеки процесів прийнятих в системі поводження з медичними відходами в Україні. Найчастіше утилізація небезпечних медичних відходів (МВ) здійснюється шляхом їх відкритого спалювання на територіях медичних чи спеціалізованих ліцензованих закладів. Процес відкритого горіння медичних відходів на відкритому повітрі як правило має температуру яка не перевищує 500-700 °C. Такі низькі температури недостатні для повної екологічно безпечної термічної утилізації та повного знищення МВ. Пояснюється це тим, що за таких низькотемпературних умов утворюються нові, також не менш небезпечні, стійкі хімічні сполуки - діоксини, фурані, соляна кислота та інші токсиканти, що

викидаються в довкілля у вигляді димових газо-аерозольних та твердих і зольних залишків. Але стійкі молекули цих речовин не демолуляризуються під час відкритого спалювання на повітрі. Тому вони попадають в навколишнє середовище і далі накопичуються в харчових циклах.

Єдиним виходом з такої ситуації може бути додаткове допалювання таких залишків за допомогою спеціально встановлених в інсинераторах додаткових камер при температурах 1100-1250 °С. Однак, застосування таких камер допалювання часто не дає бажаного ефекту доведення складу скидуваних в атмосферу димових газо-аерозольних продуктів до норм та вимог чинного, оновленого за євро стандартами, законодавства України.

З огляду на таку ситуацію МОЗ України своїм Наказом №1602 [3] зробило важливі зміни в Державних санітарно-протиепідемічних правилах і нормах щодо поводження з медичними відходами, зміни спрямовані на зменшення небезпечних ризиків та блокування шляхів потрапляння небезпечних речовин та матеріалів на побутові полігони/звалища.

В наказі №1602 головні новації стосуються класифікації медичних відходів. До безпечних відходів категорії “А” тепер включені харчові відходи інфекційних, фтизіатричних і дерматовенерологічних стаціонарів, а також первинна упаковка лікувальних та профілактичних засобів (ЛПЗ), за виключенням первинної упаковки токсичних, сильнодіючих і наркотичних ліків.

Інфекційні небезпечні медичні відходи категорії “В” (крім гострих медичних виробів), забруднені біологічними рідинами тепер, після їх оброблення, дозволено направляти на вторинне перероблення. Також значно зменшився список токсикологічно небезпечних відходів.

До категорії “С” тепер входять тільки медичні відходи, що забруднені цитостатиками, гено-токсичними, отруйними і сильнодіючими лікарськими засобами та стоматологічними амальгамами. При цьому, тепер при поводженні з МВ з вмістом ртуті, важких металів та токсикантів дозволяється не дотримуватися Державних санітарно-протиепідемічних правил і норм.

За новими нормами для усіх медично-побутових відходів, окрім харчових, вимагається їх роздільне збирання з наступною передачею для повторного використання та вторинної переробки. Медичні та інші заклади охорони здоров'я теж мають право обробляти контаміновані біологічними рідинами негострі медичні відходи й передавати їх для вторинної переробки. А якщо в медичному закладі немає відповідних умов для їх переробки, то в такому випадку відходи потрібно заактувати й передавати їх на спалювання.

Важливою екологічною новацією також є заборона процедур хімічної дезінфекції інфікованих небезпечних МФВ, що виключає операцію небезпечного замочування й ополіскування відходів.

З'явилась також нова норма, що вимагає призначення фахівців відповідальних за поводження з відходами у закладах охорони здоров'я (ЗОЗ) які зобов'язані займатися розробленням типових схем поводження з МВ та регулювання усіх дій при поводженні з МВ в ЗОЗ від їх утворення і до їх знешкодження чи транспортування, а також відповідати за виконання цих схем.

Однак, за рамками Наказу №1602 залишається проблема забезпечення сучасними технологіями для повної екологічно чистої та безпечної утилізації медичних відходів. При цьому особливу увагу слід звернути саме на технологічний аспект утилізації відходів інфекційних та туберкульозних відділень, ветеринарних відходів та відходів з ризиками рівня біологічної зброї, а також медичних відходів заражених небезпечними хворобами (ВІЛ, гепатит). При цьому, не дивлячись на значну громіздкість та перевантаженість системи поводження з медичними відходами більшість методів та засобів дезінфекції та знезараження медичних відходів вимагають їх додаткового фінішного спалювання з послідуочим транспортуванням неспалюваних зольних залишків на сміттєзвалища та полігони.

Отже, на сьогодні ситуація, що склалася, суперечить принципам державної регуляторної політики і прямим чином загрожує національній безпеці України та життю і здоров'ю громадян, руйнує міжнародні інвестиційні структури.

Для створення адекватної ефективної інноваційної технологічної інфраструктури для правильного поводження з медичними відходами та їх екологічно безпечної та ефективної утилізації, потрібен, перш за все, їх належний облік та екологічний моніторинг динаміки реальних масштабів. окресленої проблеми. При цьому впроваджені принципово нові технологій утилізації МВ до повного їх екологічно безпечного знищення повинні повно масштабно охоплювати утилізацію всього асортименту небезпечних медичних відходів, що виробляються більше як у 70-и тисячах лікарень, госпіталів та інших медзакладів та установ України.

Небезпечні ризики також має хімічна дезінфекція/зnezараження різних медичних відходів перед їх офіційною передачею ліцензованим компаніям для їх утилізації. В даному разі виникають додаткові екологічні ризики для здоров'я медичного та транспортного персоналу в результаті спільного синергетичного впливу МВ разом з хімічними дезінфектантами.

Для вирішення цієї проблеми потрібно створювати нові високотемпературні технології, здатні радикальним чином здійснювати управління медичними відходами з повноцінним гарантованим екологічним захистом та відновленням територій громад.

В Україні, для спалювання лікарняних біологічних відходів почали застосовувати відносно дорогі інсинератори які, згідно з висновками ВООЗ є технологіями, що можуть утилізувати високо небезпечні медичні відходи згідно з найжорсткішими у всьому світі вимогами нового євростандарту. Вважається, що такі інсинератори можна експлуатувати в радіусі 50 та 100 м від лікарень чи житлових будівель.



Рис. 1. Загальний вигляд інсинератора „Мюллер” С.Р.50М виробництва Франція.

Fig. 1. General view of the incinerator "Müller" S.R.50M, manufactured in France.

Для прикладу, французький інсинератор «Мюллер» С.Р.50М для спалювання органічних твердих відходів повністю знищує мікроорганізми і якщо будь-який параметр викидів перевищує відповідний євростандарт, то робота інсинератора автоматично блокується. Глибина інсинерації інфікованих медичних відходів досягає 95%, а решта 5 % зольного залишку може транспортуватись на сміттєзвалище. При середній питомій теплоті згорання відходів 3500 ккал/кг методом високотемпературного піролітичного спалювання при температурі до 850 °С в камері піролізу, з подальшим допалюванням піролізних газів при 1100-1250 °С в додатковій камері без утворення «чорного диму» і тонкодисперсного пилу продуктивність інсинераторів «Мюллер» становить 50-60 кг/годину.

В інсинераторі «Мюллер» С.Р.50М знищуються горючі медичні відходи, включаючи і епідеміологічно небезпечні, окрім радіоактивних, небезпечні біологічні відходи, прострочені та браковані фармпрепарати, стійкі органічні забруднювачі, непридатні та заборонені пестициди.

Продуктивність інсинератора „Мюллер” С.Р.50М складає 50-60 кг/годину, при середній калорійності відходів 3500 ккал/кг. Цей інсинератор знищує будь-які горючі органічні відходи, за винятком радіоактивних: небезпечні біологічні відходи ветеринарії, тваринництва, птахівництва, м'ясопереробної промисловості, прострочених фармацевтичних препаратів і відходів фармацевтичної промисловості, стійких органічних забрудників, непридатних і заборонених пестицидів. Але при цьому слід зауважити, що медичні відходи з такою калорійністю зустрічаються зовсім не часто. При цьому інсинератор „Мюллер” С.Р.50М має досить громіздкі габарити та високу матеріалоемність при його незначній непромисловій продуктивності. А принципова технологічна температурна обмеженість будь-яких інсинераторів полягає в тому, що для поглиблення “вигорання” екологічно небезпечних речовин, заново утворюваних в процесах горіння самих медичних відходів, потрібна додаткова кількість повітря спрямованого в осередок горіння. Але закачування додаткового “холодного” повітря в зону горіння знижує температуру в камері згорання медичних відходів до 400-500 °С, що, наприклад, не забезпечує гарантоване знищення патогенних екстремофільних мікроорганізмів. А застосування не спалювальних (не вогневих) засобів, таких як автоклави та гідроклави, для стерилізації відходів парою з прямим і непрямим нагріванням все одно вимагає подальшого додаткового спалювання оброблених таким чином медичних відходів у вогневих печах.

Така ж ситуація поширюється і на дуже дорогі методи мікрохвильової дезінфекції - стерилізовані таким чином медичні відходи також транспортуються разом із комунальними відходами на звалища, або спалюються.

На цьому фоні єдиною технологією здатною легко створювати в камері згорання медичних відходів температури до 10 000 °С і більше є плазмо-дугова технологія плазмохімічного піролізу. Також існують комерційно привабливі технології плазмохімічного піролізу медичних відходів які легко масштабуються для їх застосування як в локальних місцевих так і в промислових масштабах для утилізації, переробки та знищення усіх видів медичних відходів. Усі переваги високотемпературного плазмохімічного піролізу та його екологічні вигоди роблять цю технологію з точки зору екологічної безпеки поза конкурентною при обробці небезпечних токсичних відходів. І, на відміну від димовиділяючих аналогів, плазмохімічні піролізні технології знищують медичні відходи без утворення екологічно небезпечних залишків.

При застосуванні плазмохімічного піролізу для утилізації медичних відходів кількість токсичних діоксинів і фуранів значно нижча за прийняті стандарти викидів і не вимагає сортування/розділення небезпечних відходів. При цьому патогенні мікроорганізми знищуються повністю.

Отже, відкрите традиційно спалювання медичних, біомедичних і хімічних відходів на повітрі має небезпечні екологічні наслідки на тривалих відрізках часу. Тому розробка та створення нових економічно доцільних технологій для екологічно чистої та безпечної утилізації усіх видів медичних відходів набула характеру критичної необхідності. І, на сьогодні вже багато компаній у світі, наприклад: Pyrolysis Systems Inc., Канада; Siemens, Німеччина; Plasma Energy Applied Technology Inc., США; Plasmapole, Франція та інші розробляють високотемпературні плазмодугові системи різного тематичного призначення.

Аналіз світових технологій, екологічний досвід та сучасний стан застосування плазмопіролізних технологій для утилізації медичних відходів

Плазма є сумішшю нейтральних і заряджених частинок. Останні мають високу кінетичну енергію. Іонізовані заряджені частинки плазми здатні вступати в реакції рекомбінації з відірваними електронами і в цьому процесі виділяти значну енергію у формі ультрафіоле-

тового випромінювання. Кінетична енергія частинок переходить в теплову енергію, якої достатньо для деструкції хімічних речовин. Завдяки присутності в плазмі заряджених і збуджених частинок плазмове середовище стає високореактивним і здатним каталізувати гомогенні та гетерогенні хімічні реакції.

В процесі плазмо-хімічного піролізу тверді медичні відходи з вмістом вуглецю газифікуються, утворюючи газоаерозольні суміші, які піддаються охолодженню і очищенню. Очищену суміш можна використати для виробництва теплової чи електричної енергії, а також для виробництва різних палив - етанолу, водню, горючого газу. Неорганічні матеріали розплавляються під дією плазмових факелів і відбираються окремо у формі склоподібного шлаку. Високотемпературне тепло утворюваних в плазмохімічних реакторах горючих синтетичних газів можна застосувати у самому ж піролізному циклі з метою економії зовнішніх енергоресурсів. При цьому вплив плазмо-хімічного піролізу на навколишнє середовище з точки зору екологічної безпеки та його технологічності перевершує інші методи і технології поводження з медичними відходами.

На сьогодні, на різних підприємствах світу технології плазмодугового нагрівання вже використовуються в цілодобовому промисловому режимі. На заводі у Дефіансі в США експлуатується шість плазмових факелів загальною потужністю 2,5 мегават для переробки більше як 280 тон металобрухту за одну робочу зміну.

Історично першу демонстрацію прототипного зразка електродугового інсинератора у 1987 р., здійснила компанія Westinghouse Environmental Services у США. А приблизно через рік у 1988 р., в угорському Інституті електротехнічної промисловості було розроблено нову пілотну установку плазмового реактора для знищення відходів хімічної промисловості [4]. А ще через рік у 1989 році Retech Incorporation з Каліфорнії та Міністерство енергетики США ініціювали спільну програму знищення різноманітних відходів за допомогою плазмово-дугових технологій [5].

У 1994 році була створена перша оберտальна плазмове піч для обробки хлорованих органічних сполук з ефективністю знищення органічних забруднень до 99,9% з дуже високими характеристиками деструкції діоксинів та фуранів на рівні $(5-9) \cdot 10^{-3}$ нг/м³, що набагато менше за нормативні екологічні світові стандарти.

Далі, на протязі багатьох років в різних компаніях світу досліджувалися процеси плазмодугового очищення багатьох сотень різних типів відходів в промислових масштабах. При цьому ефективно перероблювалися та утилізувалися тверді побутові та медичні відходи, зола, автошини, вугільні та шламові відходи, поліхлорований біфеніл, небезпечні види золувиносу, фарби, розчинники, різні матеріали із звалищ і полігонів, а також низько радіоактивні відходи та інше.

Компанії CSIRO/Siddons Ramset Ltd's Plascon, Retech, Westinghouse Plasma Inc., Plasma Energy Corporation та інші компанії продовжують розробку великих системи для плазмової утилізації відходів.

В процесі плазмохімічного піролізу основними сполуками, що утворюються з вуглецевої речовини є метан, монооксид вуглецю, водень, вуглекислий газ і молекули води. Плазмохімічний піроліз об'єднує термохімічні особливості плазми з процесом піролізу за допомогою високотемпературних плазмових дуг в середовищах з дефіцитом кисню для повної глибокої деструкції небезпечних речовин у відходах на простіші молекули. При цьому важливою особливістю плазмпіролізу в порівнянні з традиційного спалювання ТМВ є те, що попереднє сортування хлорованих відходів значно спрощується або стає зовсім непотрібним.

Термін "плазмохімічний піроліз" визначає процес розкладу органічних сполук, що здійснюється в низькотемпературній плазмі із середніми енергіями молекул порядку 0,1-50 eV. Плазмохімічний піроліз вуглеводнів може здійснюватися безпосередньо в електричній дузі (електрокрекінг), або в плазмовому струмені водню чи іншого газу. Будь-який матеріал під впливом термічної плазми з температурою $T \sim 10^4$ °C, розкладається на свої елементарні складові. Саме цей ефект дає можливість організації технологічного процесу плазмової переробки для руйнування стійких екологічно небезпечних хімічних сполук, що містяться в

медичних відходах або утворюються в процесі їх спалювання. У порівнянні з існуючими технологіями, обробка медичних та інших відходів термічною плазмою має наступні переваги:

1. При високих температурах виникають реакції плазмохімічної деструкції небезпечних молекул та важких забруднюючих молекулярних комплексів, а також відбувається розплавлення та оскловування неорганічної складової медичних відходів, що дозволяє значно зменшити об'єми відходів і герметично коксувати забруднення, що важко руйнуються.

2. Висока щільність енергії в плазмовому факелі до 200 ГДж/м^3 , дає можливість створювати високопродуктивні мобільні та стаціонарні установки з меншими капітальними витратами. Компактні розміри та висока щільність енергії суттєво скорочують час виходу на режим та на включення/відключення установок.

3. Використання електричної дуги як джерела енергії дозволяє відокремити процес тепловиділення від процесу кисневого окислення і при цьому він є незалежним від витрат окислювача або повітря. Використання високотемпературних електричних дуг також знижує витрати різних плазмоутворюючих газів.

4. Потужне ультрафіолетове випромінювання плазмової дуги значно прискорює деструкцію відходів, що є особливо дієвим в процесах піролізу органічних хлоридів. Високі температури [6] у реагентній зоні мінімалізують тривалість термообробки і дозволяють досягти високої продуктивності при переробці/утилізації відходів. Однак, для ефективного управління плазмохімічними процесами потрібно контролювати певний список параметрів піролізу і застосовувати автоматизовані засоби контролю та керування процесами плазмопіролізу.

5. Економічну ефективність плазмохімічних засобів переробки можна підвищити шляхом синтезу різних комерційних продуктів з високою доданою вартістю як для зовнішніх так і для внутрішніх власних потреб.

3. Мета роботи.

Запропонувати нові технологічні підходи та екологічні перспективи високотемпературного плазмохімічного піролізу щодо утилізації небезпечних медичних та фармацевтичних відходів. Розкрити переваги застосування високотемпературного плазмохімічного піролізу.

4. Виклад основного матеріалу.

Мобільні плазмопіролізні установки. В останні роки технологічна критичність ситуації з утилізацією медичних відходів у різних країнах технологічний та екологічний інтерес викликають мобільні плазмопіролізні установки. Технологічна блок-схема, загальний вигляд та конструкційні особливості вітчизняної мобільної плазмопіролізної установки "Плазмон-3" для утилізації медичних відходів, розробленої і виготовленої в Україні, представлена на рис. 4 [7].

Для організації неперервного плазмопіролізного процесу температура в плазмохімічному реакторі повинна підтримуватися на рівні $1100\text{-}1250 \text{ }^\circ\text{C}$. Причому кожний локальний об'єм газу, що одержується в процесі переробки відходів, повинен перебувати в указаній температурній зоні $\leq 2\text{с}$ [8]. У таких температурних умовах токсиканти повністю розкладаються, а хлор присутній у хлоридній кислоті (HCl) легко утворює солі в процесах очищення. Для блокування повторного утворення токсикантів продукти плазмопіролізу потрібно швидко охолодити. Особливо інтенсивно екологічно небезпечних продуктів піролізу утворюються в діапазоні температур $200\text{-}650 \text{ }^\circ\text{C}$ з максимумом при температурі $\approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$. Для того, щоб хлор зв'язався в стійкі хімічні сполуки процес охолодження продуктів плазмопіролізу завершується їх прокачуванням через вапняний розчин (вапняне молоко) або через розчин соди [9].

Найпоширенішим способом закалювання при плазмопіролізі є охолодження в теплообмінниках. Цей спосіб застосовують для охолодження газів із температурою до $3700 \text{ }^\circ\text{C}$. Також широко використовується метод закалювання продуктів плазмохімічного процесу струменями води або іншого рідкого чи газового реагента.

На рисунку 2 представлена блок-схема мобільної плазмохімічної піролізної установки “Плазмон-3”. Слід відмітити, що ця установка може застосовуватися для перероблення різних радіо фармацевтичних відходів [10].

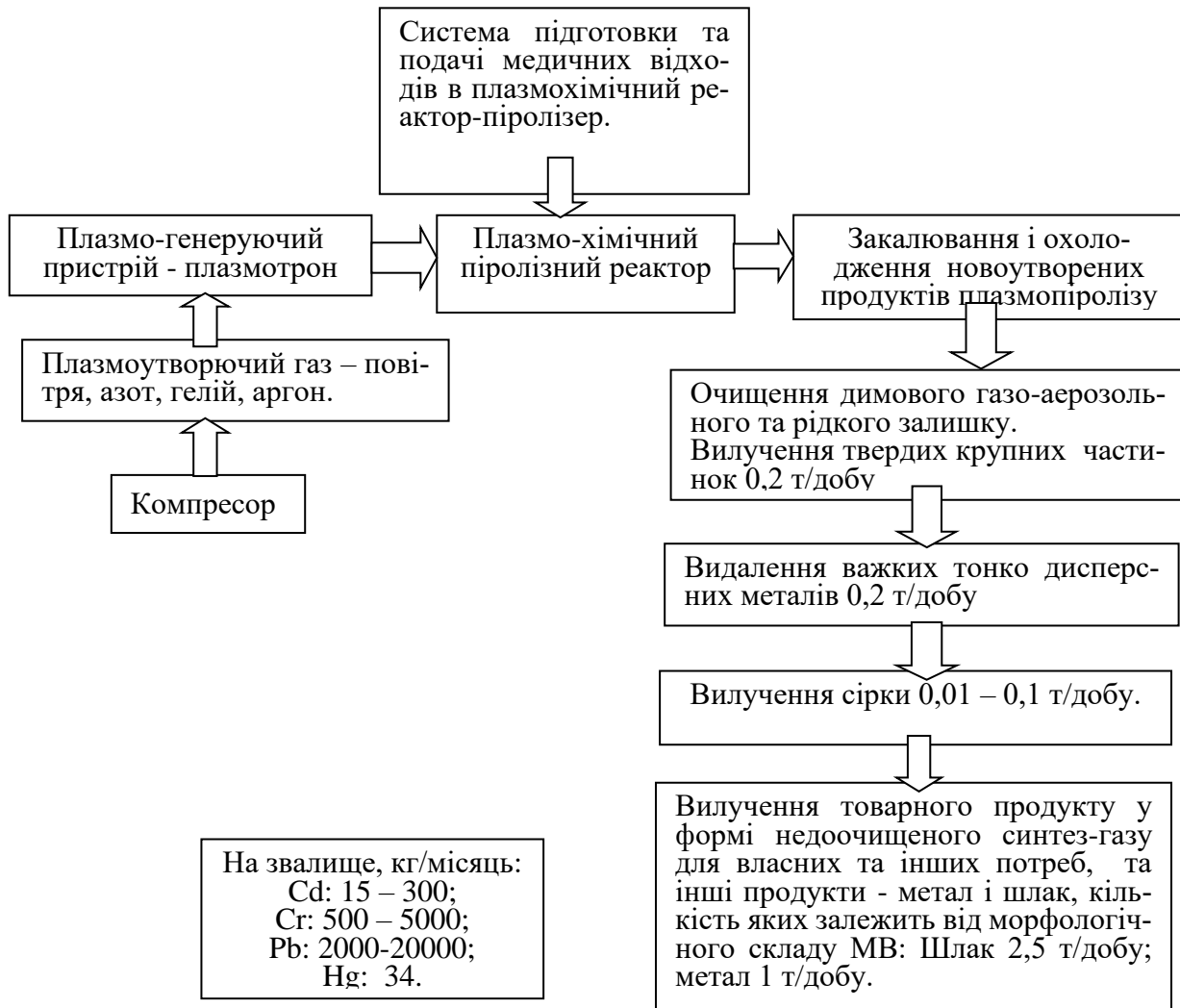


Рис. 2. Блок-схема плазмохімічної піролізної установки “Плазмон-3” для переробки та утилізації медичних відходів з наступними характеристиками: 10-12 т/добу; вологість - 20%; неорганічна компонента – 20%; спеціальні добавки – 1,5 т/добу; кокс – 0,4 т/добу.

Fig. 2. Block diagram of the plasma-chemical pyrolysis plant "Plasmon-3" for processing and disposal of medical waste with the following characteristics: 10-12 t/day; humidity - 20%; inorganic component - 20%; special additives - 1.5 t/day; coke - 0.4 t/day.

Принципова схема промислово-експериментальної плазмопіролізної установки «Плазмон-3», на якій проводилися авторські дослідження процесів плазмо піролізу, представлена на рис. 3.

Головними компонентами кожної плазмопіролізної установки є: плазмо генератор, блоки електроживлення та охолодження плазмо генератора, плазмопіролізний реактор, компресор для подачі плазмоутворюючих газів на плазмо генератор, система підготовки медичних відходів та їх подачі у плазмопіролізний реактор, система охолодження для закалювання продуктів плазмопіролізу, комунікаційний системний блок, пульт керування, блок накопичення неспалюваного залишку, система очищення остаточних димових газоаерозольних продуктів, інші допоміжні та контрольні системи.

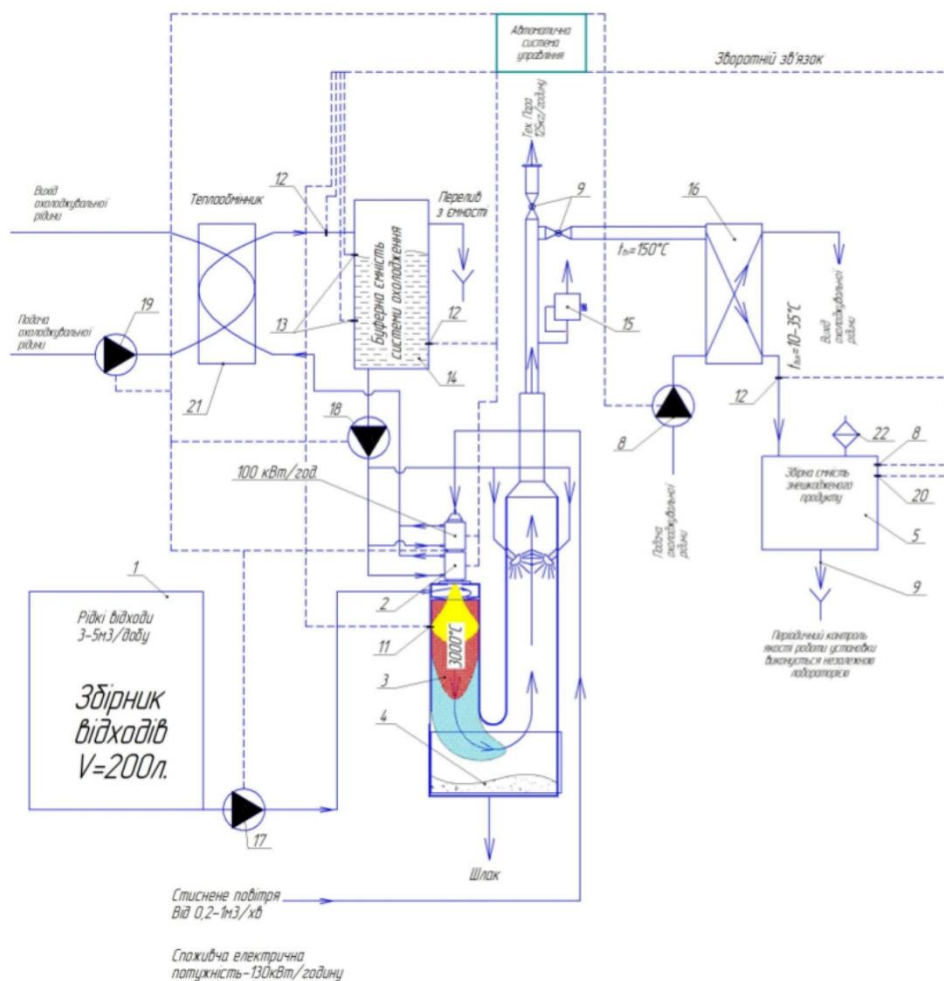


Рис. 3. Принципова схема плазмопіролізної установки Плазмон-3
 Fig. 3. Schematic diagram of the Plasmon-3 plasma pyrolysis unit

Вибір плазмогенератора. Плазмогенератор є центральним елементом кожної плазмопіролізної установки. Історично у перших генераторах плазми в 1960-х роках застосовувалися вугільні електроди. Але короткий робочий ресурс таких електродів блокував розвиток та поширення плазмохімічних піролізних технологій. В результаті подальших розробок і створення нових, ефективніших плазмогенераторів плазмові технології почали застосовуватися для екологізації процесів деструкції високотоксичних і тугоплавких сполук. В плазмохімічних реакторах почали обробляти тверді, газоподібні та рідкі речовини. При цьому потужне ультрафіолетове випромінювання в плазмовому струмені здатне дегідратувати органічний хлор. Подальший потужний імпульс для свого технологічного розвитку плазмогенератори отримали в результаті розвитку космічних технологій у 1960-х роках.

Конструктивно плазмогенератор являє собою електророзрядне джерело, через яке під тиском прокачується плазма утворюючий газ для утворення плазмового струменю, який з катодно-анодного простору плазмогенератора виводиться назовні. В електродугових плазмогенераторах плазмоутворюючі гази можна швидко нагрівати до тисяч і десятків тисяч градусів. Для охолодження конструкційних високотемпературних елементів плазмотрону використовують повітря або воду. І хоча водяне охолодження ускладнює конструкцію плазмотрона, зате воно підвищує робочий ресурс його катоду.

Дослідження, випробування та застосування плазмодугового нагрівання у світі почали швидко розвиватися у 1970-1980 роках плазмові установки вже експлуатувалися на великих промислових підприємствах.



Рис. 4. Загальний вигляд установки «Плазмон-3» для плазмохімічного піролізу медичних відходів
 Fig. 4. General view of the "Plasmon-3" installation for plasma chemical pyrolysis of medical waste

Плазмогенератори (ПГ) з температурою утворюваної ними плазми до $50000\text{ }^{\circ}\text{C}$ називаються низькотемпературними мають широке практичне застосування: зварювання, різання та напилювання металів; електродугова обробка поверхонь; нагрівання матеріалів в плазмових печах; підвищення хімічної чистоти металів і сплавів; наукові дослідження плазмових фізичних та плазмохімічних процесів; плавка металевого пилю; виробництво хімічно високо чистого кремнію і багато іншого. Вплив прямої дуги на оброблюваний об'єкт стає значно інтенсивнішим внаслідок нагрівання від дифузійного руху електронів та від ультрафіолетового випромінювання дугового розряду.

Історично впровадження плазмових технологій розпочалося в умовах недостатності детальних знань про хімічні особливості взаємодії плазми з різними матеріалами. Винятковим було застосування плазми в електрометалургії та при виготовленні оптоволокон.

Плазмогенератори із непрямою електродугою створюють високошвидкісний плазмовий потік з температурами $10\text{-}4000\text{ }^{\circ}\text{C}$, в залежності від потужності плазмогенератора, від його конструкції та від типу плазмоутворюючого газу. При цьому $10\text{-}30\%$ електричної потужності струменю плазми витрачаються у водоохолоджувальній системі. Якщо ж, в певному діапазоні швидкостей частинок плазми для охолодження гарячого газоаерозольного потоку,

утвореного на виході з плазмопіролізного реактора, застосовувати фізичні аеродинамічні методи які, наприклад, можна реалізувати у вигляді сопла Лавваля, то теплові втрати стають значно меншими. Додатковим тепловим резервом для підвищення ефективності, стійкості та екологічної безпеки плазмопіролізу є утворення плазмопіролізного синтез-газу та його зворотне спрямування в плазмохімічні процеси, що протікають в плазмопіролізному/ плазмохімічному реакторі.

Стійку роботу плазмогенератора також часто забезпечують шляхом вихрового закручування плазмового факела поблизу холодного або точкового катода, затопленого у мідь. При цьому діаметр каналу, для виведення плазмового факелу з плазмогенератора назовні, повинен бути в п'ять-шість разів більшим за діаметр анода. За таких умов плазмові частинки матимуть середні значення швидкостей приблизно 200 м/с. Це надзвичайно важливий параметр який має конструктивне значення. За його значенням визначається довжина ефективної реагентної зони плазмопіролізного реактора.

Існують також електродугові печі для переробки відходів у яких спочатку використовують непряму дугу, а вже після утворення електропровідного середовища переключаються в режим прямої дуги для отримання інтенсивніших потоків теплової енергії.

Плазмогенератори з прямою та з непрямою електродугою застосовуються з термоємними або з "холодними" (водо охолоджуваними) катодами. Застосування спеціальних електродних сплавів для їх виготовлення збільшує їх робочий ресурс при роботі на відкритому повітрі більше як до 1000 годин.

Сучасні плазмо генератори, придатні для утилізації відходів, в основному працюють на постійному струмі для реалізації кращого контролю поведінки електричної дуги як в потоці, так і в точці анодної прив'язки. Ці плазмогенератори також знижують/скорочують процес корекції коефіцієнта потужності і встановлення фільтрів для захисту від завад від зовнішніх електромереж. Інколи з метою досягти великої напруги горіння електродуги для підвищення ККД плазмогенератора застосовують вуглекислий газ або азот.

Для гарантованого інтенсивного перемішування плазми та відходів в реагентному просторі реактора потрібні високі входні швидкості та малі діаметри сопла в реакторній камері змішування. Тоді такі плазмогенератори становляться придатними для переробки та утилізації газів та рідин.

Отже, дуже високі температури в плазмовому струмені роблять можливим застосування плазмогенераторів для переробки медичних та інших відходів з невідомим чи змінним складом. Надзвичайно короткий час протікання плазмохімічних реакцій в плазмохімічному реагентному просторі реактора створює певні проблеми з очищенням продуктів плазмового спалювання, утворюваних в швидкісному прямому чи турбулентному потоці заново утвореної газоаерозольної димової суміші, що підлягає її екологічному очищенню за допомогою складних і дорогих систем.

Іще одним методом забезпечення інтенсивного змішування є створення турбулентних плазмових струменів. При цьому відходи для переробки інжектуються в плазмохімічний реактор а не безпосередньо в зону навколо плазмового факелу.

Ідеальний плазмо утворюючий газ для спалювання медичних відходів та інших матеріалів не повинен створювати додаткові забруднення; не вимагати додаткової сепарації продуктів реакції та спеціальних запобіжних екологічних заходів; мати високу теплоємність; повинен підвищувати ефективність всього технологічного процесу спалювання; не збільшувати швидкість зношування електродів; не утворювати похідних токсичних сполук; збільшувати ефективність роботи реактора; бути доступним і дешевим.

В практичній площині жоден із існуючих плазмо утворюючих газів не відповідає повноті цих вимог. Наприклад, високий вміст азоту, який безпосередньо не бере участі в плазмохімічній деструкції, вже є технологічним та екологічним недоліком. Чистий кисень суттєво збільшує коефіцієнт деструкції, а сам кисень прискорює деградацію матеріалів обладнання. Утворюваний атомарний водень теж дуже сприяє деструкції галогенвуглецевих зв'язків та пришвидшує руйнування вуглеводнів.

Енергоефективність переробки відходів значно прискорюється при застосуванні водяної плазми. При цьому водяна пара грає велику роль у теплопереносі. Молекулярний водень має велику енергію зв'язку і тому його рекомбінація призводить до виділення великої кількості теплоти з утворенням хімічно високоактивного атомарного водню.

Деградації електродів у плазмогенераторі можна запобігти якщо застосовувати радіочастотний індукційний плазмохімічний реактор у якому складний плазмовий факел створюється струмом високої частоти в діапазоні 2-27 МГц, що протікає в котушці навколо робочої камери. Для такого плазмогенератора потрібен спеціальний спосіб введення відходів у деіструкційну камеру (згорання).

Радіочастотні плазмо генератори відомі як ВЧ-генератори плазми можуть ефективно руйнувати також небезпечні медичні рідини при їх впорскуванні в розрядний/реагентний простір. Рівень потужності ВЧ-плазмогенераторів може змінюватись в інтервалі 0.5 кВт - 1 МВт, а робоча частота в діапазоні від 9.6 кГц для потужностей менше 200 кВт - до 40 МГц. Найчастіше промислові джерела живлення з потужністю до 150 кВт мають робочу частоту 2.6 МГц.

В порівнянні з плазмотронами постійного струму тепловий ККД ВЧ-плазмогенераторів може мати значення 40-60%. При цьому основні втрати відбуваються на джерелі живлення. Також ще є втрати на індукцію між плазмою та індукційною котушкою, які є функцією відношення між радіусом плазми та радіусом індукційної котушки. Також є втрати при передачі енергії стінкам обмежувальної трубки. При одній і тій же величині втрат внутрішній діаметр ВЧ-плазмогенератора приблизно на порядок більший за діаметр газового тракту плазмогенератора постійного струму.

У ВЧ-плазмогенераторі значення робочих температур знаходяться в діапазоні 6000-10000 °К. У плазмогенераторах постійного струму – в діапазоні 7000-14000 °К. Швидкості плазми у ВЧ-плазмогенераторах не перевищують 100 м/с, що значно менше ніж у плазмогенераторах постійного струму.

Внаслідок скін-ефекту нагрівання головним чином здійснюється в поверхневому шарі плазми. При цьому електропровідність плазми пропорційна концентрації електронів і для більшості газів, окрім чистого гелію, провідність має суттєво зростає в температурному діапазоні 6000-7000 °С при нормальних значеннях атмосферного тиску.

Сьогодні на світовому ринку практично усі плазмо-дугові установки мають плазмогенератори постійного струму. Зокрема, в Україні в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона також виготовлявся універсальний плазмогенератор ПУН-1, і саме його було вибрано для наших установок «Плазмон-1,2,3». В даному плазмо генераторі можна збільшити робочий ресурс електродів якщо за допомогою магнітного поля обернути анодний кінець електричної дуги.

Особливості процесів плазмохімічного піролізу.

В результаті плазмохімічного піролізу в реакторі в процесі згорання відходів утворюються молекули CO, H₂ та вуглеводні. Згорання утворених синтезованих горючих газів у реагентній зоні реактора дозволяє підтримувати стабільну температуру вище 1100 °С. А для того, щоб блокувати виникнення плазмохімічних реакцій рекомбінації газоподібних молекул, які призводять до утворення діоксинів і фуранів, гарячі плазмопіролізні гази охолоджують приблизно до 500°-70 °С. І тоді, як показують результати газового аналізу, кількість токсичних газів в димових залишках, перебуває в межах норм дозволених для атмосферних викидів.

У якості плазмоутворюючого газу можна використовувати молекулярний азот N₂. У первинній камері температура згорання МВ досить швидко може досягти значення 900°С. А піролізні гази спалюються у вторинній камері допалювання в умовах додаткового продування через неї повітря. В результаті піролізні гази згоряють, утворюючи довгий вогневий факел.

Після плазмохімічної високотемпературної плазмової обробки в високотемпературній первинній камері лікарняних відходів-імітаторів (суміш бавовни та пластику в пропорції

2:1) відбувається розкладання полімерів та виділення низькомолекулярних газів. Гарячі гази, що виходять з вторинної камери, пропускаються через гасник-скрублер з лужним водяним розчином ($pH = 12$) для зниження їх температури до 80°C і менше.

В результаті плазмохімічного піролізу хлорованих відходів утворюються молекули хлоридної кислоти (HCl) які присутні в газоподібній суміші. Для очищення суміші від них здійснюють гасіння лужним розчином, який блокує рекомбінаційні молекулярні процеси і значно знижує кількість заново утворених токсичних хімічних сполук. Залишкові газоерозольні димові гази видуваються вентилятором в атмосферу через димову трубу.

Високотемпературне плазмове середовище також повністю знищує всі види бактерій про що свідчать результати бактеріальних аналізів на присутність в димових залишках мікроорганізмів *Bacillus stearothermophilus* і *Bacillus subtilis* спеціально вирощених в лабораторії на полосках з нержавіючої сталі і які потім пропускалися через високотемпературне плазмове середовище в первинній камері.

Проблема практичного комерційного використання утвореного в плазмохімічному реакторі горючого синтез-газу, наприклад, для виробництва теплової та електричної енергії, полягає в тому, що цей газ повинен пройти через складну систему його очищення від корозійно-активних та токсичних речовин. Простіше і ефективніше використовувати цей синтез-газ в неочищеному вигляді для власних потреб плазмопіролізної установки з метою стабілізації високої температури та одночасного допалювання вже утворених небезпечних речовин.

Правила, методи та вимоги щодо безпечної утилізації медичних відходів регулюються як державними, так і міжнародними нормами [11-15].

Польова утилізація воєнних медичних відходів, утворених в результаті ведення війн, також потребує нових методів, підходів і технологій, тому що значна їх частина «закопується в землю» та спалюється.

В Афганістані, Іраку військові медичні та військові побутові відходи обливали токсичним авіаційним паливом і спалювали. В результаті утворювані канцерогенні продукти згоряння відходів призвели до масових захворювань військовослужбовців, включаючи й інфекційні захворювання. Тому у 2012 році Конгрес США вимушено прийняв законопроект про створення реєстру військових, які постраждали внаслідок такого спалювання медичних відходів. У 2014 році в реєстрі значилось більше як 90000 хворих. Цей досвід наглядно свідчить про масштабну небезпеку відкритого спалювання військових медичних та інших небезпечних відходів у разі недотримання температурних умов при відсутності відповідної системи нейтралізації та очищення димових та зольних продуктів згоряння.

На сьогодні у країнах НАТО вже існують санітарні вимоги для поводження з медичними відходами військових медичних підрозділів/закладів [16]. В російській окупаційній армії теж впроваджено багатофункціональний серійний мобільний інсинератор УУМО-01 з жорсткими екологічними характеристиками, що відповідають вимогам євростандартів для знезараження та для вимог екологічної безпеки [17].

Вихідними умовами та даними для розробки, конструювання та створення мобільних польових плазмопіролізних установок для знищення медичних військових відходів в їх основу зокрема доцільно покласти вимоги STANAG 2982. Згідно з положеннями цих вимог, за умови розгортання нестационарних медичних підрозділів слід дотримуватися спеціальних конкретних санітарних вимог при поводженні з твердими медичними відходами:

1) дотримуватися загальних правил безпеки праці при наданні медичної допомоги пораненим/хворим, та при поводженні з відходами, при цьому накопичуються рукавички, маски, фартухи, та інші, що перешкоджають передачі трансмісивних захворювань від пацієнтів - найчастіше такі предмети класифікують як загальні не медичні відходи.

2) сортувати/відокремлювати медичні відходи сортуються від загальних відходів на місці розташування медичного підрозділу/закладу та не змішувати медичні відходи з іншими загальними відходами;

3) зберігати медичні відходи в спеціальних червоних сумках/контейнерах стійких до проколів та витоків рідин або у відповідно маркованих сумках для відходів забруднених/просяклих кров'ю, або із слідами запеченої крові. Якщо використовуються сумки/контейнери не червоного кольору, то інший колір повинен бути чітко зазначений на них, і на сумках (контейнерах) повинно бути зазначено «Небезпечні медичні відходи»;

4) гострі предмети - шприци, голки, скальпелі, вироби із скла слід збирати в спеціальні міцні, стійкі до проколів та протікання рідин, пластмасові/металеві контейнери/відра з кришкою. При цьому забороняється: випорожнювати контейнери меншого розміру в контейнер більшого розміру, ламати голки - їх необхідно поміщати прямо в контейнери для гострих предметів. При від'єднанні голки від шприца дотримуватися правил техніки безпеки;

5) зібрані медичні відходи спалюються чи стерилізуються з їх подальшим захороненням або утилізуються іншими альтернативними технологіями. Попіл спалених МВ засипають у відкритий циліндричний 200 літровий контейнер який після заповнення евакуюють на санітарне звалище, обладнане відповідно до національних стандартів. Якщо в попелі немає гострих медичних голок, лез скальпелів і т.п., то попіл може вважатися загальним сміттям і його захоронення можливе у спеціально визначеному місці в оперативній зоні.

У разі неможливості спалювання медичних відходів рекомендується їх стерилізація в автоклавах та парових стерилізаторах після чого МВ теж розцінюються як загальне сміття, що видаляється згідно з встановленим порядком та з дотриманням техніки безпеки при поводженні з гострими предметами. Забороняється використовувати польові хірургічні або стоматологічні стерилізатори для автоклавування медичних відходів. За відсутності способів видалення медичних відходів на місці (в оперативній зоні), вони евакуюються за межі оперативної зони. Найменш бажаним варіантом видалення медичних відходів є їх захоронення на місцевому санітарному звалищі після погодження з місцевими представниками охорони здоров'я.

У польових воєнних умовах найбільш актуальною, чисельною і небезпечною групою відходів є відходи групи В. Виходячи з відповідних вимог даного наказу зрозуміло, що при таких умовах можливе лише збирання, сортування та маркування відходів у відповідні ємності та їх подальша евакуація за межі оперативної зони згідно з рекомендаціями [18].

5. Висновки.

1. Електродуговий процес плазмохімічного піролізу відповідає всім технічним вимогам що стосуються обробки небезпечних медичних відходів і його легко підтримувати в реакторному реагентному безкисневому середовищі. Також можна змінювати плазмоутворюючий газ, що подається в плазмогенератор і, тим самим, змінювати хімічні особливості процесів, що протікають в реагентному середовищі плазмохімічного реактора.

2. Технологія плазмохімічного піролізу усуває практично всі недоліки інших існуючих технологій утилізації відходів і являє собою комплексне рішення для безпечної утилізації медичних відходів з конверсією органічної маси в газ понад 99% і не потребує сегрегації хлорованих вуглеводнів. Після згоряння відходів токсичні гази на виході з установки присутні в незначній кількості та відповідають нормативним екологічним вимогам. При цьому висока температура та УФ-випромінювання плазмового струменю, повністю знищують бактерії/мікроорганізми.

3. В процесі плазмохімічного піролізу лікарняних відходів-імітаторів було визначено, що без попереднього підігріву первинної камери в ній відбувається забарвлення білого кольору залишкової димової газоаерозольної суміші на виході з димової труби. Утворення білого диму або іншого не чорного кольору відбувається в результаті зменшення температури в реакторі. Білий дим може утворюватися в результаті випаровування вуглеводнів, які конденсуються в рідкий аерозоль і який, у разі наявності домішок у вигляді твердих часточок [19]. Після попереднього прогрівання відходів утворюється сіро-чорний дим, що означає наявність протікання реакцій плазмопіролізу з утворенням стабільних темних частинок. В реакторі також утворюється частинки сажі з розмірами кластерів від 300 до 600 нм, зразки якої досліджувалися на електронному мікроскопі.

4. Отримуваний в результаті плазмопіролізу синтез-газ можна спалювати для власних потреб в реагентній зоні установки, що дає можливість економії електроенергії від зовнішніх джерел.

5. Результати порівняльного аналізу, існуючих на сьогодні технології утилізації комунальних, медичних та інших муніципальних і промислових відходів демонструють переваги плазмохімічного піролізу і роблять його поза конкурентним при утилізації небезпечних токсичних відходів, і, на відміну від димових аналогів, їх викиди в довкілля токсичних діоксинів і фуранів значно нижчі за прийняті стандарти, і не вимагає розділення небезпечних відходів. При цьому патогенні мікроорганізми знищуються повністю.

6. Доцільним і вигідним повинна бути розробка та створення автономних мобільних модульних плазмопіролізних установок потужністю 50-100 кВт на базі вітчизняних плазмогенераторів ПУН-1 з оптимальною витратою плазмоутворюючих газів, перш за все повітря, в кількості 2-15 м³/годину, при мінімальних витратах технічної води для охолодження плазмогенератора від 150 до 200 г/с при КККД до 70 %, та при оптимальній температурі плазмового струменю на виході із сопла плазмотрона від 4300 до 5000 °К, що підтверджується експериментальними вимірюваннями.

7. Для очищення залишкових димових газів може застосовуватися комбінація вихрового скрубера та спеціальних фільтрів з додатковими системами в разі необхідності. А для досягнення повного спалювання медичних відходів та їх модельних сумішей необхідно передбачити можливість додаткової подачі повітря до 1300 м³/годину з тиском приблизно в 0,1 МПа.

Список використаних джерел.

1. Наказ МОЗ України № 325 від 08.06.2015 «Про затвердження Державних санітарно-протиепідемічних правил і норм щодо поводження з медичними відходами»
2. Базельська конвенція, Директиви ЄС, наказ МОЗ України від 08.06.2015 № 325
3. Наказ №1602 від 06.09.2022 "Про затвердження Змін до Державних санітарно-протиепідемічних правил і норм щодо поводження з медичними відходами"
4. Krajcsovics, F., Pocsy, F., Emho, L. And Puskas, Zs. In Hazardous Waste: Detection, Control, Treatment (ed. Abbou, R.), Elsevier, Amsterdam, 1988, pp. 1609–1614.
5. Cretenot, D., Vanrenterghem, J., Labrot, M. and Pineau, D., EPRI Symposium on Industrial and Environmental Applications of Plasma, Palo Alto, California, 7–9 March 1990.
6. S.K. Nema, K.S. Ganeshprasand. Plasma pyrolysis of medical waste. – Current Science, vol. 83, No. 3, 10 August 2002, p. 271-278
7. Патент на корисну модель № 154899 Установка для плазмової деструкції відходів, - Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі", - Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей 27.12.2023.
8. Жовтянський В.А. Петров С.В. Орлик В.М. Якимович М.В. Вакілов І.М. Назаренко В.Г. Вабіщевич М.С. Волошинюк І.М. Якубишин Ю.А., та ін. Переробка небезпечних і радіоактивних відходів із використанням плазмових технологій, - Екологічні науки, - 2018, - №2(21), - с. 49-58.
9. Керівні принципи для найкращих існуючих методів і попередні вказівки для найкращих видів природоохоронної діяльності застосовано до статті 5 та додатку до Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі UNEPS/POPS/COP.1/INF/7.205. 371 р.
10. Семерак М.М., Лис С.С., Коваленко Т.П. Аналіз процесу плазмової переробки радіоактивних відходів, - Ядерна та радіаційна безпека, - 1(81), 2019Ю – с. 23-29.
11. Закон України «Про відходи» від 05.03.1998 № 187/98-ВР // Відомості Верховної Ради України від 25.09.1998. – 1998. – № 36. – С. 242].
12. Закон України «Про приєднання України до Базельської конвенції про контроль за транскордонними перевезеннями небезпечних відходів та їх видаленням» - <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=803-14>.
13. Директива ЄС 2000/76/WE від 04.12.2000 «Про спалювання»].
14. Наказ МОЗ України від 08.06.2015 № 325 «Про затвердження Державних санітарно-протиепідемічних правил і норм щодо поводження з медичними відходами»
15. Офіційний вісник України від 08.09.2015 – 2015 р. – № 69. – С. 297, ст. 2298, код акту 78316/2015.

16. STANAG 2982 «Essential field sanitary requirements» - Дотримання санітарно-гігієнічних вимог у польових умовах.
17. О.В. Горішна, Ю.М. Депутат, О.М. Іванько, А.А. Кожокару, В.А. Баркевич, В.В. Нарожнов. Проблема утилізації відходів медичних відходів у польових умовах, - Інфекційні хвороби, - 2018, - 91, - с. 40 – 45.
18. STANAG 2982 «Essential field sanitary requirements» – Дотримання санітарно-гігієнічних вимог у польових умовах) [STANAG 2982 «Essential field sanitary requirements».
19. Brunner, C. R., Hazardous Air Emissions from Incineration, Chapman and Hall, New York, 1986, p. 45.

References.

1. Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 325 dated 08.06.2015 "On Approval of the State Sanitary and Anti-Epidemic Rules and Regulations on Medical Waste Management"
2. The Basel Convention, EU Directives, Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 325 of June 08, 2015
3. Order No. 1602 of 06.09.2022 "On Approval of Amendments to the State Sanitary and Anti-Epidemic Rules and Regulations on Medical Waste Management"
4. Krajcsovics, F., Pocsy, F., Emho, L. And Puskas, Zs. In Hazardous Waste: Detection, Control, Treatment (ed. Abbou, R.), Elsevier, Amsterdam, 1988, pp. 1609-1614.
5. Cretenot, D., Vanrenterghem, J., Labrot, M. and Pineau, D., EPRI Symposium on Industrial and Environmental Applications of Plasma, Palo Alto, California, March 7-9, 1990.
6. S.K. Nema, K.S. Ganeshprasand. "Plasma pyrolysis of medical waste." - Current Science, vol. 83, No. 3, August 10, 2002, p. 271-278.
7. Utility model patent No. 154899 Installation for plasma destruction of waste, - Issued in accordance with the Law of Ukraine "On Protection of Rights to Inventions and Utility Models", - Registered in the State Register of Utility Models of Ukraine on 27.12.2023
8. Zhovtianskyi V.A. Petrov S.V. Orlyk V.M. Yakymovych M.V. Vakilov I.M. Nazarenko V.G. Vabishchevych M.S. Voloshyniuk I.M. Yakubyshyn Y.A., et al. Recycling of hazardous and radioactive waste using plasma technologies, - Ecological Sciences, - 2018, - No. 2 (21), - pp. 49-58.
9. Guidelines for Best Available Techniques and Preliminary Guidance for Best Environmental Practices applied to Article 5 and Annex to the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants UNEPS/POPS/COP.1/INF/7.205. 371 p.
10. Semerak M.M., Lis S.S., Kovalenko T.P. Analysis of the process of plasma processing of radioactive waste, - Nuclear and Radiation Safety, - 1(81), 2019Y - pp. 23-29.
11. Law of Ukraine "On Waste" of 05.03.1998 No. 187/98-BP // Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine of 25.09.1998 - 1998. - No. 36. - P. 242].
12. The Law of Ukraine "On Accession of Ukraine to the Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal" -<http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=803-14>
13. EU Directive 2000/76/WE of December 04, 2000 on incineration].
14. Order of the Ministry of Health of Ukraine of 08.06.2015 No. 325 "On Approval of the State Sanitary and Epidemiological Rules and Regulations on Medical Waste Management"
15. Official Gazette of Ukraine of 08.09.2015 - 2015 - No. 69 - P. 297, Article 2298, Code of Act 78316/2015.
16. STANAG 2982 "Essential field sanitary requirements" - Compliance with sanitary and hygienic requirements in the field.
17. Horishna O.V., Deputat Y.M., Ivanko O.M., Kozhokaru A.A., Barkevych V.A., Narozhnov V.V.. Problem of utilization of medical waste in the field, - Infectious diseases, - 2018, - 91, - pp. 40 – 45.
18. STANAG 2982 "Essential field sanitary requirements" [STANAG 2982 "Essential field sanitary requirements"].
19. Brunner, C. R., Hazardous Air Emissions from Incineration, Chapman and Hall, New York, 1986, p. 45.

УДК 721.01

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-40.0311>**Ілля Святогорів,**

аспірант кафедри Технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520>E-mail: tall.arh@gmail.com**ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ ТЕРИТОРІЇ ВНУТРІШНЬОГО ДВОРУ СЕКЦІЙНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЙОГО ОРІЄНТАЦІЇ**

АНОТАЦІЯ. В умовах підвищення середньорічних температур мешканці міст стикаються з проблемою значного нагрівання міських поверхонь, які зазнають вплив прямої сонячної радіації. Цей процес безпосередньо впливає на мікроклімат, як всієї міської забудови, так і окремо взятих прибудинкових територій. Важливу роль у терморегуляції житлового середовища відіграє затінення поверхонь, що підтверджують численні дослідження з цієї тематики. Впровадження природних методів щодо зменшення температурного режиму стає актуальним у розрізі зниження теплового стресу та загальної економії енергії. У статті на прикладі секційного житлового дев'ятиповерхового будинку П-подібної конфігурації, проведено дослідження залежності відсотка затінення і кількості потрапляння прямої сонячної радіації на територію двору щодо його орієнтації за сторонами світу. Розрахунок проводили для ясного дня липня 2021 року, коли середня місячна температура складала 24,6 °C за даними Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського. Із розрахунку викреслили вплив оточуючої забудови і зелених насаджень. Кількість потрапляння прямої сонячної радіації на кв.м. поверхні пораховано за допомогою спеціалізованої програми Townscope. На базі отриманих результатів побудовані графіки попадання загальної кількості прямої сонячної радіації на поверхні в розрахунковий період часу з 6:00 до 18:00 для різних орієнтацій дворового простору. Також обчислено відсоток затінення від загальної площі розрахункових поверхонь. Для кожної розрахункової поверхні створено зведені таблиці даних. Підсумкові результати мають рекомендаційний характер для проєктних організацій при визначенні оптимального розпланувального рішення на стадії передпроєктних розробок. Такий екологоорієнтований підхід, закладений в основу проєктних робіт, здатний поліпшити умови життя в міських поселеннях, зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та зробити міста більш стійкими до змін клімату.

Ключові слова: сонячна радіація, кліматичні зміни, орієнтація будинків, нагрівання поверхонь, затінення поверхонь.

THERMAL REGIME OF THE TERRITORY OF THE COURTYARD OF A SECTIONAL RESIDENTIAL BUILDING DEPENDING ON ITS ORIENTATION

ABSTRACT. As average annual temperatures rise, residents of urban areas face the problem of significant heating of urban surfaces exposed to direct solar radiation. This process has a direct impact on the microclimate of both the entire urban area and individual adjacent territories. Shading of surfaces plays an important role in the thermoregulation of the living environment, which is confirmed by numerous studies on this topic. The introduction of natural methods to reduce the temperature regime is becoming relevant in terms of reducing heat stress and overall energy savings. In this paper, using the example of a sectional residential building of a U-shaped configuration with nine floors, we study the dependence of the percentage of shading and the amount of direct solar radiation entering the courtyard on its orientation to the cardinal points. The calculation was performed for a clear day on July 21, when the average monthly temperature was 24.6 °C according to the Boris Sreznevsky Central Geophysical Observatory. The calculation excluded the influence of surrounding buildings and green spaces. The amount of direct solar radiation per square meter of surface was calculated using the specialized Townscope program. Based on the results obtained, graphs of the total amount of direct solar radiation on the surface during the calculated period from 6:00 to 18:00 for different orientations of the courtyard space were built. The percentage of shading of the total area of the design surfaces was also calculated. Summary data tables were created for each design surface. The final results are of a recommendatory nature for design organizations in determining the optimal planning solution at the pre-design stage. Such an environmentally friendly approach, which is the basis of design work, can improve living conditions in urban settlements, reduce the negative impact on the environment, and make cities more resilient to climate change.

Keywords: *Solar radiation, climate change, building orientation, surface heating, surface shading.*

1. Вступ. Наразі світова архітектурна практика базується на положенні, що стан довкілля має безпосередній вплив на якість життя людини. Пасивні системи контролю мікроклімату, які використовують природні процеси для регулювання теплового режиму та відмова від джерел енергії, що забруднюють довкілля, стають основою безпечного і здорового міського середовища [1,2].

Традиційний процес проектування багатоквартирних житлових будинків на стадії розміщення архітектурних об'єктів на генеральному плані спирається значною мірою на конфігурацію відведених ділянок під забудову та композиційно-просторові рішення. Така ситуація зумовлена жорсткими умовами щільної міської забудови, коли необхідно вписати новий архітектурний об'єкт в наявну містобудівну історію. Виходячи з цього, сучасні стратегії, які спрямовані на створення енергоефективної архітектури, зазвичай обмежуються використанням спеціалізованих матеріалів оздоблення фасадів із високою відбивною здатністю сонячної радіації або матеріалів з високою абсорбцією для максимального поглинання тепла, у залежності від поставлених завдань і кліматичних умов будівництва [3]. Періодично проводяться оцінки впливу вертикального озеленення фасадів на температуру повітря в міських районах у різні часи доби та сезони [4,]. Проте, під час планування нових міських поселень, на ділянках, які не мають жорстких обмежень, слід враховувати ще один фактор: оптимальне положення геометрії житлових будинків мікрорайону щодо сторін світу. Даний метод дозволяє оптимізувати управління сонячною енергією, зменшуючи негативний вплив перегріву поверхонь фасадів на мікроклімат мікрорайону в піковий літний період та сприяє створенню більш комфортного та енергоефективного середовища як усередині будівлі, так і на прилеглих територіях [5–7].

На сьогодні наукові дослідження теплового режиму міст зосереджені насамперед на вивченні різниці температур між міськими та сільськими поселеннями, впливу кількості озеленення на мікроклімат урбанізованих територій, а також – впливу значної кількості кам'яних поверхонь на формування міського острова тепла [8,9]. Окремим осередком є низка робіт, що фокусуються на вивченні сонячного довгохвильового обміну між будівлями і навколишнім середовищем на рівні невеликих житлових утворень [10,11]. За результатами таких досліджень було доведено, що зовнішні поверхні стін і дахів поглинають частину сонячної радіації, а потім повертають у навколишній простір довгохвильове випромінювання. Тобто кількість сумарної сонячної радіації, що сприймають фасади будівель під час експлуатації, безпосередньо впливає на температурний режим простору мікрорайону в цілому. Значні за площею поверхні фасадів будинків, які мають південну орієнтацію, в періоди тривалої сонячної активності накопичують більше тепла. Останнє призводить до підвищеного теплового випромінювання цих поверхонь, що в свою чергу збільшує температуру повітря прилеглих територій [12].

Сонячна радіація, яка поглинається вертикальною поверхню фасаду, і, відповідно, нагрівання фасаду безпосередньо залежить від кута падіння сонячних променів на дану поверхню. Чим більш крутий кут падіння прямих сонячних променів на площину, тим менше сонячної енергії поглинається одиницею площі. І навпаки, чим ближче кут падіння прямих сонячних променів до перпендикулярної осі поверхні, тим більше сонячної енергії вона отримує. Така залежність між кутом падіння сонячних променів і кількістю поглиненої сонячної енергії є ключовою для розуміння теплового режиму будівель та їхнього оточення [13].

Найбільш поширеним нині підходом у світовій архітектурній практиці для розуміння механізмів утворення комфортного енергоефективного житлового середовища є аналіз вже сформованого проектного рішення за допомогою сучасних спеціалізованих програм [14,15]. Комп'ютерні моделі дозволяють доволі точно спрогнозувати майбутній мікроклімат прибудинкової території, щоби зробити певні висновки і відповідні корективи проекту щодо можливостей його покращення ще на початку роботи. Деякою мірою, вони являють собою ідеа-

льний інструмент для проєктанта. Однак програми такого типу потребують поступового введення заздалегідь визначених даних: поверховості, площ будинків, площ озеленення та мощення прибудинкової території, інше. Багаторазовий підрахунок техніко-економічних показників за наявності декількох варіантів істотно сповільнює процес проєктування і прийняття остаточних рішень. Нерідко експертний рівень використання програм моделювання мікроклімату вимагає спеціалізованого навчання або курсів підвищення кваліфікації робітників, що не завжди є пріоритетом на етапі розробки передпроектних пропозицій.

2. Постановка проблеми досліджень. В Україні тематикою вивчення факторів, які впливають на мікроклімат житлової забудови, займалися ще за часи радянської доби. Основною ціллю проведених досліджень була стандартизація схеми розміщення житлових будинків заради скорочення загальних фінансових витрат за швидкого освоєння нових територій. Також акцент було поставлено на покращенні освітленості та інсоляції житлових кімнат без врахування кліматичних особливостей конкретної місцини. Результати наукових робіт мали характер чітких інструкцій для проєктних організацій, які займалися розробленням генеральних планів міст. Прикладом таких реалізованих містобудівних рішень стала спочатку рядкова (стрічкова) п'ятиповерхова забудова в 1960–1970-х, потім замкнена або напівзамкнена периметральна забудова наприкінці ХХ ст. [16]. Кожна структура мала низку недоліків, що впливало на коефіцієнт енергоефективності будівель під час експлуатації.

Після набуття Україною незалежності, на підставі передових світових тенденцій та появою новітніх матеріалів оздоблення і технологій, було реалізовано багато різнокомпозиційних житлових комплексів. Інсоляційні розрахунки зазвичай лягали в основу розпланувальних рішень і рішень, пов'язаних з висотою цих об'єктів. Попри те, питанню перегріву фасадів у задуманих і вже побудованих об'єктах, на наш погляд, приділено недостатньо уваги.

Існуючі дослідження на цю тему розглядають питання надходження сонячної радіації, нагріву поверхонь і впливу приземного шару на температуру повітря в рамках точкового узагальненого підходу до проблеми [17–21]. Вони також не опрацьовують вищезазначені питання в контексті різних природнокліматичних зон України [22], де кількість прямої сонячної радіації і кількість сонячних днів упродовж року відмінні між собою.

3. Мета роботи. Визначити і порівняти відсоток затінення поверхонь і кількість прямої сонячної радіації, що потрапляє на підстилаючу поверхню внутрішнього двору та фасади будинку в залежності від його орієнтації щодо сторін світу для І кліматичної зони України для уникнення теплового стресу та комфортного перебування мешканців на прибудинкових територіях.

4. Матеріали і методи. Як майданчик дослідження було обрано типову П-подібну схему забудови 5-секційного 9-поверхового житлового будинку. Загальна площа секцій в плані орієнтовно складає 550 м^2 . Загальна площа підстилаючої поверхні двору 2200 м^2 . Параметри поверховості і площі було обрано, спираючись на існуючу тенденцію в будівництві на межі міста Києва та Київської області. Заради уніфікації розрахунків, геометрію секцій вирішено спростити до паралелепіпедів. Окрім цього, дана П-подібна конфігурація блокування секцій створює ефект самозатінення фасадів і часткового затінення внутрішнього двору (рис. 1), що також позитивно впливає на загальну температуру поверхонь. Із розрахунку виключено вплив оточуючої забудови. Підстилаючу поверхню вирішено прийняти вільною від дерев і кущів, щоби виключити вплив непередбачуваної затіненості.

Розрахунки кількості потрапляння прямої сонячної радіації виконані в спеціалізованій програмі Townscope, яку було створено однойменною бельгійською компанією в Університеті Льежа під час здійснення європейського проєкту POLIS. На початку роботи авторами підготовлено відповідну 3Д модель будівлі і експортовано в формат 3ds.

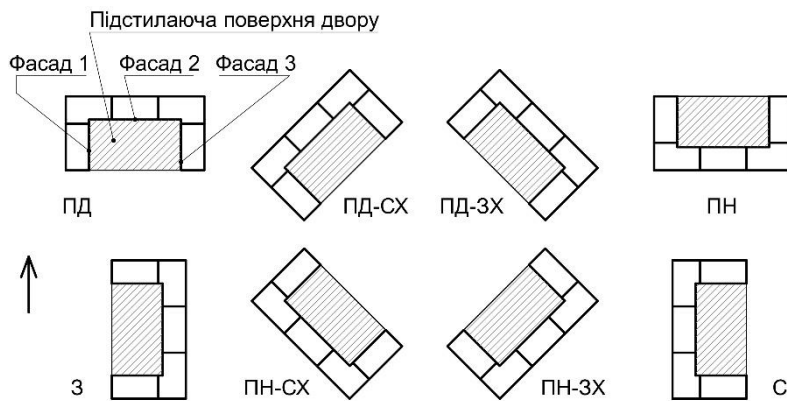


Рис. 1. Схеми розташування будинку і підстилаючої поверхні двору щодо сторін світу
 Fig. 1. Diagrams of the location of the house and the underlying surface of the yard in relation to the cardinal points

Розрахунки проводилися для міста Києва та Київської області, що відповідає I кліматичній зоні України. Розрахунковий період – липень 2021 року. За даними Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського, середня температура повітря в липні складала 24,6 С°.

На першому етапі за допомогою програми Townscope в проміжок часу з 6:00 по 18:00 було погодинно пораховано кількість потрапляння прямої сонячної радіації ($Вт/м^2$) на фасади внутрішнього двору і підстилаючу поверхню внутрішнього двору (Рис. 2). Також пораховано загальний відсоток затінення (R_z) поверхонь у рамках зазначеного часу.

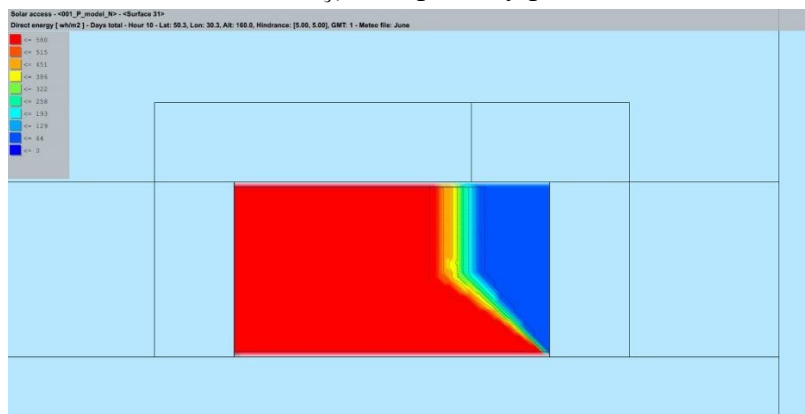


Рис. 2. Кількість потрапляння прямої сонячної радіації на підстилаючу поверхню двору південної орієнтації на 10:00

Fig. 2. The amount of direct solar radiation on the underlying surface of a south-facing yard at 10 am

На другому етапі – було обчислене сумарне значення потрапляння прямої сонячної радіації погодинно на кожну площину, яка досліджується для різних схем орієнтації ($I_{пр}$). Для розрахунку використано формулу (1):

$$I_{пр} = S_{осв} \times I_q, \quad (1)$$

де $S_{осв}$ ($м^2$) - площа поверхні території, яка зазнає пряму сонячну радіацію в розрахункову годину; I_q ($Вт/м^2$) - кількість прямої сонячної радіації в розрахункову годину.

На основі отриманих даних, було побудовано графіки, за якими можна наочно прослідкувати сумарний приплив прямої сонячної енергії погодинно на поверхні, що досліджується (Рис. 3).

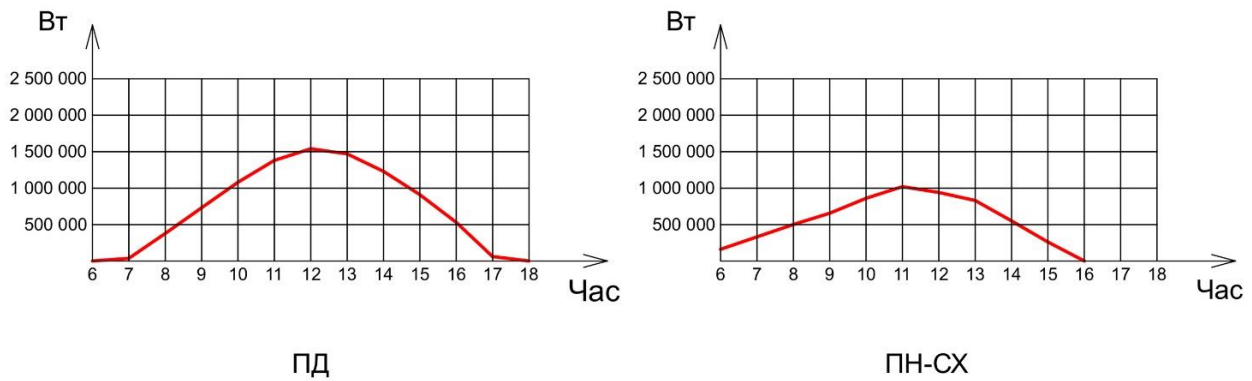


Рис. 3. Графіки погодинної зміни сумарної кількості прямої сонячної радіації
 Fig. 3. Graphs of hourly changes in the total amount of direct solar radiation

Отримані результати для поверхні внутрішнього двору, фасаду 1, фасаду 2 і фасаду 3 обчислено і оформлено в таблиці. Приклад представлено в таблиці 1.

Таблиця 1. Кількість прямої сонячної радіації і відсоток затінення підстилаючої поверхні двору відносно сторін світу.

Table 1: The amount of direct solar radiation and the percentage of shading of the underlying surface of the yard in relation to the cardinal points.

Орієнтація	Показник	Розрахунковий час (год)												
		06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
ПД	Тінь (м ²)	2200	1750	1050	630	340	110	0	110	340	630	1050	1750	2200
	Тінь (%)	100	79,5	47,7	28,6	15,5	5,0	0	5,0	15,5	28,6	47,7	79,5	100
	Пряма СР Вт/м ²	0	81	328	465	580	661	702	702	662	580	464	128	0
ПД-СХ	Тінь (кв.м)	760	510	300	110	0	60	260	470	760	1150	1650	2200	2200
	Тінь (%)	34,5	23,2	13,6	5,0	0	2,7	11,8	21,4	34,5	52,3	75,0	100	100
	Пряма СР Вт/м ²	85	195	328	465	580	661	702	702	662	580	448	0	0
ПД-ЗХ	Тінь (м ²)	2200	2200	1650	1150	760	470	260	60	0	110	300	510	760
	Тінь (%)	100	100	75	52,3	34,5	21,4	11,8	2,7	0	5,0	13,6	23,2	34,5
	Пряма СР Вт/м ²	0	0	317	465	580	661	702	702	662	580	464	328	196
ПН-СХ	Тінь (м ²)	310	470	690	790	720	650	860	1020	1360	1750	2150	2200	2200
	Тінь (%)	14,1	21,4	31,4	35,9	32,7	29,5	39,1	46,4	61,8	79,5	97,7	100	100
	Пряма СР Вт/м ²	85	195	328	465	580	661	702	702	662	580	35	0	0
ПН-ЗХ	Тінь (м ²)	2200	2200	2150	1750	1360	1020	860	650	720	790	690	470	310
	Тінь (%)	100	100	97,7	79,5	61,8	46,4	39,1	29,5	32,7	35,9	31,4	21,4	14,1
	Пряма СР Вт/м ²	0	0	23	465	580	661	702	702	662	580	464	328	196
ПН	Тінь (м ²)	1600	1750	1450	1280	1210	1150	1080	1150	1210	1280	1450	1750	1600
	Тінь (%)	72,7	79,5	65,9	58,2	55,0	52,3	49,1	52,3	55,0	58,2	65,9	79,5	72,7

	Пряма СР <i>Вт/м²</i>	85	162	328	465	580	661	702	702	662	580	464	269	196
З	Тінь (<i>м²</i>)	2200	2200	2200	1610	1160	790	560	480	350	190	50	0	50
	Тінь (%)	100	100	100	73,2	52,7	35,9	25,5	21,8	15,9	8,6	2,3	0	2,3
	Пряма СР <i>Вт/м²</i>	0	0	0	386	580	661	702	702	662	580	464	328	196
С	Тінь (<i>м²</i>)	50	0	50	190	350	480	560	790	1160	1610	2200	2200	2200
	Тінь (%)	2,3	0	2,3	8,6	15,9	21,8	25,5	35,9	52,7	73,2	100	100	100
	Пряма СР <i>Вт/м²</i>	85	195	328	465	580	661	702	702	662	531	0	0	0

На третьому етапі були обчислені загальні значення прямої сонячної енергії кожної поверхні, що досліджується за формулою (2):

$$I_{\text{заг}} = \frac{\sum I_{\text{пр}}}{S_{\text{пов}} - (S_{\text{пов}} R_z / 100)}, \quad (2)$$

де $\sum I_{\text{пр}}$ - сумарна кількість прямої сонячної радіації всіх розрахункових годин; $S_{\text{пов}}$ - загальна площа розрахункової поверхні; R_z - відсоток затіненості.

Всі показники беруться із таблиць, які представлені в роботі. Для порівняння результатів дослідження сформовано зведену таблицю 2. Для зручності порівняння кінцевих результатів накреслено графік (Рис 4).

Таблиця 2. Сумарні значення прямої сонячної радіації і відсотка затінення впродовж 6:00 – 18:00 год.

Table 2. Total values of direct solar radiation and percentage of shading from 6:00 to 18:00.

Найменування поверхні	Площа пове- рхні (<i>м²</i>)	Затінення (%)							
		ПД	ПД- СХ	ПД- ЗХ	ПН- СХ	ПН- ЗХ	ПН	З	С
Фасад 1	1050	48,8	61,5	42,7	80,4	36	54,2	28,8	80,9
Фасад 2	1900	31,1	40,7	40,7	70,6	70,6	86,8	50,4	50,4
Фасад 3	1050	48,9	42,5	61,5	31,6	80,2	54,4	80,7	28,9
Підстилаюча пове- рхня двору	2200	42,5	36,5	36,5	53	53	62,8	41,4	41,4
Загальний % заті- нення		41,2	43	43,1	59,4	60,1	67,3	48,7	48,7
		Пряма СР (<i>Вт/м²</i>)							
		ПД	ПД- СХ	ПД- ЗХ	ПН- СХ	ПН- ЗХ	ПН	З	С
Фасад 1	1050	4230	2792	4033	4127	5411	6608	3446	640
Фасад 2	1900	3821	4145	5174	2737	4667	1150	6473	4309
Фасад 3	1050	6123	4899	4761	4125	2538	4381	367	3377
Підстилаюча пове- рхня двору	2200	7393	6527	7078	5924	6720	6555	6712	5566
Загальна кількість прямої СР		21567	18363	21046	16913	19336	18694	16998	13892

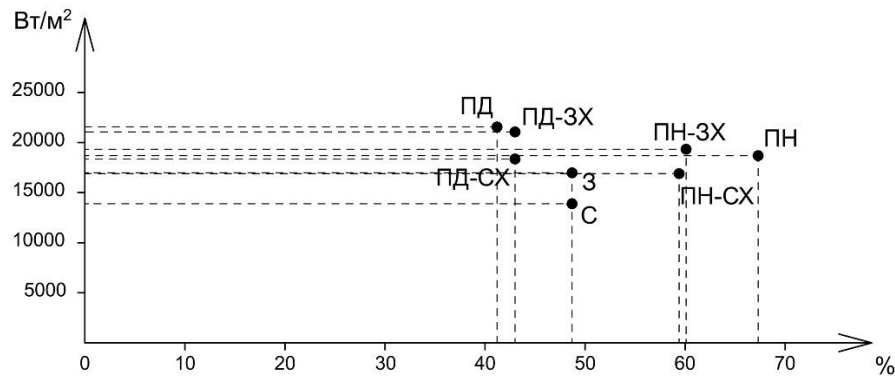


Рис. 4. Залежності величини відсотка затінення поверхонь від сумарної кількості радіації в розрахунковий проміжок часу щодо сторін світу.

Fig. 4. Dependences of the percentage of shading of surfaces on the total amount of radiation during the calculated time period relative to the cardinal points.

Отримані дані свідчать, що східна і західна сторона орієнтації двору є найбільш сприятливими для такої схеми блокування секцій, адже співвідношення відсотка затінення та сумарної кількості прямої сонячної радіації, що безпосередньо впливає на збільшення температурного режиму прибудинкової території, перебувають у певній збалансованості значень. Слід зазначити, що результати досліджень мають рекомендаційний характер і актуальні саме для пікового літнього періоду, коли нагрівання поверхонь і теплообмін є максимальним. Північна і південна орієнтації двору є найбільш несприятливими і, в разі неможливості уникнути такого містобудівного рішення, потребують додаткових заходів для регулювання температурного режиму.

Дане дослідження було проведене для I кліматичної зони України. В подальших роботах планується зробити розрахунки для інших кліматичних зон. Також доцільно провести подібні дослідження для різних комбінацій блокування типових секцій з метою виявлення доцільного містобудівного рішення з погляду природного регулювання мікроклімату житлових кварталів.

5. Висновки. Зміна клімату і феномен глобального потепління спонукають архітекторів до переосмислення концепції генерального плану під час проєктування нових житлових утворень. До сучасних технологічних рішень зменшення теплового навантаження на житлове середовище в певній пропорції слід включати стратегії природного охолодження прибудинкових територій і житлових помешкань. Оптимальна орієнтація основних фасадів житлової структури з погляду зменшення теплового навантаження на фасади і прибудинкову територію, що закладена на стадії проєктування, дає змогу створити баланс між енергоефективністю самих будівель і теплокомфортністю майбутнього житлового середовища.

Дане дослідження щодо розміщення секційних будинків П-подібної конфігурації на генеральному плані щодо сторін світу дає змогу попередньо оцінити переваги і доцільність обраних архітектором варіантів з метою зниження екологічного ризику на здоров'я населення та запобігання теплового стресу.

Список використаних джерел:

1. Mark Bomberg, Michael Gibson, Jian Zhang. A concept of integrated environmental approach for building upgrades and new construction: Part 1- setting the stage. *Journal of Building Physics*, Volume 38, Issue 4, Pages: 360 – 385. URL: <https://doi.org/10.1177/1744259114553728> (дата звернення: 13.02.2024).
2. Ahmed A.Y. Freewan. Advances in Passive Cooling Design: An Integrated Design Approach. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.87123> (дата звернення: 06.02.2024).

3. Doya M, Bozonnet E, Allard F. Experimental measurement of cool facades performance in a dense urban environment. *Energy Build* 2012; 55: 42–50. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.001> (дата звернення: 06.02.2024).
4. Yun Gao, Ensiyeh Farrokhirad, Adrian Pitts. The Impact of Orientation on Living Wall Facade Temperature: Manchester Case Study. *Sustainability* 2023, Volume 15, Issue 14, 11109, URL: <https://doi.org/10.3390/su151411109> (дата звернення: 13.02.2024).
5. Debanjali Banerjee. Computational Review and Assessment of The Urban Heat Island Effect and Its Impact on Building Space Conditioning. *ENQ*, Volume 20, Issue 2. URL: <https://arcc-journal.org/index.php/arccjournal/article/view/1152> (дата звернення: 13.02.2024).
6. Thomas Dougherty, Rishie K. Jain. Invisible Walls: Exploration of Microclimate Effects on Building Energy Consumption in New York City. *Sustainable Cities and Society (SCS)*, Volume 90, March 2023, 104364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104364> (дата звернення: 13.02.2024).
7. Krishna Prasad A, Sanjith S Anchan, Shambavi Kamath M, Vijayalakshmi Akella. Impact of Building Orientation on Energy Consumption in the Design of Green Building. *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, ISSN: 2278-9359 (Volume-6, Issue-2). URL: <https://www.researchgate.net/publication/326478143> (дата звернення: 15.02.2024).
8. Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu, G. J. F. van Heijst. The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: a case study for Antwerp, Belgium. *International Journal of Climatology*, Volume 38, Issue S1, April 2018, Pages e303–e322. URL: <https://doi.org/10.1002/joc.5371> (дата звернення: 15.02.2024).
9. U.S. Environmental Protection Agency. 2008. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. URL: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium> (дата звернення: 15.02.2024).
10. Peng Wu, Yisheng Liu. Impact of Urban Form at the Block Scale on Renewable Energy Application and Building Energy Efficiency. *Sustainability* 2023, 15(14), 11062; URL: <https://doi.org/10.3390/su151411062> (дата звернення: 15.02.2024).
11. Jason Charalambides, Joseph Wright. Effect of Early Solar Energy Gain according to Building Size, Building Openings, Aspect Ratio, Solar Azimuth, and Latitude. *Journal of Architectural Engineering*, Volume 19, Issue 3. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000129](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000129) (дата звернення: 11.02.2024).
12. Hongxuan Zhou, Guan Wang, Dan Hu and Jing Sun. Horizontal heat impacts of a bare facade on air temperature in an adjacent green plot within pedestrian heights in Beijing. *Indoor and Built Environment*, Volume 30, Issue 3, Mar 2021, Pages 293–434. URL: <https://journals.sagepub.com/share/B5DNJP3EZPN8HH2TXDTK?target=10.1177/1420326X19892673> (дата звернення: 13.02.2024).
13. Yola L., & Chin Siong H. (2016). Solar Radiation and Urban Wind Effect on Urban Canyon in Hot, Humid Regions. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 1(4), Pages: 220–229. URL: <https://doi.org/10.21834/e-bpj.v1i4.384> (дата звернення: 15.02.2024).
14. Adrien Gros, Emmanuel Bozonnet, Christian Inard, Marjorie Musy. Simulation tools to assess microclimate and building energy – A case study on the design of a new district. *Energy and Buildings*, Volume 114, 15 February 2016, Pages 112–122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.032> (дата звернення: 13.02.2024).
15. ENVI-met: веб-сайт. URL: <https://www.envi-met.com/> (дата звернення: 06.02.2024).
16. Вітвицька Є.В. Мікроклімат і енергоефективність систем житлової міської забудови та їх регулювання. *Наукове фахове видання Науково-технічний збірник «Енергоефективність в будівництві та архітектурі»*. – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 8 – С. 65–71.
17. Козятник І.П. Планувальна організація житлових територій із застосуванням методів регулювання теплового режиму мікроклімату: автореф. дис. канд. архіт.: 18.00.04 / І. П. Козятник ; Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – К., 2015. – 23 с
18. Вітвицька Є.В. Удосконалення містобудівних норм України щодо регулювання мікроклімату в забудові міст // *Сучасні проблеми технічного регулювання у будівництві: збірник наукових праць*, КНУБА. – К., 2015. – Вип. 1 – С. 13–19. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/1037> (дата звернення: 16.02.2024).
19. Кашенко Т. О. Підвищення енергоефективності житлових будинків на основі оптимізації їх форми: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. арх.: спец. 18.00.02 «Архітектура будівель і споруд» / Кашенко Т. О. - К.: КНУБіА, 2001. – 20 с.

20. Кривенко О.В. Геометричне моделювання інтеграції сонячної енергії у висотні біокліматичні будівлі. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2019. №96. С. 51-57. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2019.96.51-57> (дата звернення: 20.02.2024).
21. Омеляненко М. В., Омеляненко М. В., Комфортне середовище для людини та оновлене нормативне регулювання. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. Випуск 58. 2020. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.58.118-128> (дата звернення: 20.02.2024).
22. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. Прийнятий Мінрегіонбудом України 16.12.2010. – [Чинний від 2011-11-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – II, 123 с.

References:

1. Mark Bomberg, Michael Gibson, Jian Zhang. A concept of integrated environmental approach for building upgrades and new construction: Part 1- setting the stage. *Journal of Building Physics*, Volume 38, Issue 4, Pages: 360 – 385. URL: <https://doi.org/10.1177/1744259114553728>.
2. Ahmed A.Y. Freewan. Advances in Passive Cooling Design: An Integrated Design Approach. URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.87123> (дата звернення: 06.02.2024).
3. Doya M, Vozonnet E, Allard F. Experimental measurement of cool facades performance in a dense urban environment. *Energy Build* 2012; 55: 42–50. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.001>.
4. Yun Gao, Ensiyeh Farrokhirad, Adrian Pitts. The Impact of Orientation on Living Wall Facade Temperature: Manchester Case Study. *Sustainability* 2023, Volume 15, Issue 14, 11109, URL: <https://doi.org/10.3390/su151411109>.
5. Debanjali Banerjee. Computational Review and Assessment of The Urban Heat Island Effect and Its Impact on Building Space Conditioning. *ENQ*, Volume 20, Issue 2. URL: <https://arcc-journal.org/index.php/arccjournal/article/view/1152>.
6. Thomas Dougherty, Rishee K. Jain. Invisible Walls: Exploration of Microclimate Effects on Building Energy Consumption in New York City. *Sustainable Cities and Society (SCS)*, Volume 90, March 2023, 104364. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104364>.
7. Krishna Prasad A, Sanjith S Anchan, Shambavi Kamath M, Vijayalakshmi Akella. Impact of Building Orientation on Energy Consumption in the Design of Green Building. *International Journal of Emerging Research in Management & Technology*, ISSN: 2278-9359 (Volume-6, Issue-2). URL: <https://www.researchgate.net/publication/326478143>.
8. Y. Toparlar, B. Blocken, B. Maiheu, G. J. F. van Heijst. The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: a case study for Antwerp, Belgium. *International Journal of Climatology*, Volume 38, Issue S1, April 2018, Pages e303-e322. URL: <https://doi.org/10.1002/joc.5371>.
9. U.S. Environmental Protection Agency. 2008. Reducing urban heat islands: Compendium of strategies. URL: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-compendium>.
10. Peng Wu, Yisheng Liu. Impact of Urban Form at the Block Scale on Renewable Energy Application and Building Energy Efficiency. *Sustainability* 2023, 15(14), 11062; URL: <https://doi.org/10.3390/su151411062>.
11. Jason Charalambides, Joseph Wright. Effect of Early Solar Energy Gain according to Building Size, Building Openings, Aspect Ratio, Solar Azimuth, and Latitude. *Journal of Architectural Engineering*, Volume 19, Issue 3. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000129](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000129).
12. Hongxuan Zhou, Guan Wang, Dan Hu and Jing Sun. Horizontal heat impacts of a bare facade on air temperature in an adjacent green plot within pedestrian heights in Beijing. *Indoor and Built Environment*, Volume 30, Issue 3, Mar 2021, Pages 293-434. URL: <https://journals.sagepub.com/share/B5DNJP3EZPN8HH2TXDTK?target=10.1177/1420326X19892673>.
13. Yola L., & Chin Siong H. (2016). Solar Radiation and Urban Wind Effect on Urban Canyon in Hot, Humid Regions. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 1(4), Pages: 220–229. URL: <https://doi.org/10.21834/e-bpj.v1i4.384>.
14. Adrien Gros, Emmanuel Bozonnet, Christian Inard, Marjorie Musy. Simulation tools to assess microclimate and building energy – A case study on the design of a new district. *Energy and Buildings*, Volume 114, 15 February 2016, Pages 112-122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.032>.
15. ENVI-met: веб-сайт. URL: <https://www.envi-met.com/>.
16. Vitvitskaya E.V. (2016). Mikroklimat i energoefektivnist sistem zhitlovoyi miskoyi zabudovi ta yih reguluyuvannya [Microclimate and energy efficiency of residential building and urban regulation].

- Energoefektivnist v budivnictvi ta arhitekturi – Energy-Efficiency in Civil Engineering and Architecture*, 8, Pages . 65–71.
17. Kozyatnik I.P. (2015) Planuvalna organizaciya zhitlovih teritorij iz zastosuvannyam metodiv regulyuvannya teplovogo rezhimu mikroklimatu [Planning organization of residential areas with the use of methods of regulating the thermal regime of the microclimate]: autoref. thesis Ph.D. architect.: 18.00.04. *Kyyivs'kyi Natsional'nyy Universytet Budivnytstva I Arkhitektury – Kyiv National University of Construction and Architecture*.
 18. Vitvitskaya E.V. (2015). Udoskonalennya mistobudivnih norm Ukrayini shodo regulyuvannya mikroklimatu v zabudovi mist [Improvement of urban planning regulations on ukrainian regulation of the microclimate]. *Suchasni problemi tehnicnogo regulyuvannya u budivnictvi: zbirnik naukovih prac – Modern problems of technical regulation in construction*, 1. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/987654321/1037>
 19. Kashenko T. O. (2001). Pidvishennya energoefektivnosti zhitlovih budinkiv na osnovi optimizaciyi yih formi [Improving the energy efficiency of residential buildings by optimizing their shape]: autoref. thesis Ph.D. architect.: 18.00.02. *Kyyivs'kyi Natsional'nyy Universytet Budivnytstva I Arkhitektury – Kyiv National University of Construction and Architecture*.
 20. Krivenko O.V. (2019) Geometrichne modelyuvannya integraciyi sonyachnoyi energii u visotni bioklimatichni budivli [Geometric modeling of solar energy integration into high-rise bioclimatic buildings]. *Prikladna geometriya ta inzhenerna grafika – Applied geometry and engineering graphics*, 96. URL: <https://doi.org/10.32347/0131-579x.2019.96.51-57>.
 21. Omelyanenko M. V., Omelyanenko M. V. (2020). Komfortne seredovishe dlya lyudini ta onovlene normativne regulyuvannya [Comfortable environment for people and updated regulations]. *Suchasni problemi arhitekturi ta mistobuduvannya – Modern problems of architecture and urban planning*, 58. URL: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2020.58.118-128>.
 22. DSTU-N B V.1.1–27: 2010. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivnelna klimatolohiia [Protection from dangerous geological processes, harmful operational influences, fire. Construction Climatology.]. Kyiv: Minrehiou Ukrainy [in Ukrainian].

Наукове видання

ТЕХНІКА БУДІВНИЦТВА

Збірник наукових праць

Випуск 40

Підписано до друку 30.06.2024

Умовн. друк. арк. 14.4

Формат 60×84 1/8

Обл.-вид. арк. 13.5

Папір офсетний. Друк різогр.

Тираж 100. Зам. №356

Адреса редакції: 02000, м. Київ, проспект Повітряних сил України, 31, кім.603б.
Тел. +38 044 241-5548, e-mail: motp@knuba.edu.ua