

ISSN 2413-8959

Техніка будівництва

Збірник наукових праць



Construction Engineering

Collection of scientific works

1(38), 2023

Construction Engineering

Техніка буді- вництва

Collection of
scientific works

Збірник
наукових праць

Issue 1(38)

Випуск 1(38)

2023

2023

Published since 1997

Видається з 1997 року

Kyiv National
University of Construction
and Architecture

Київський національний
університет будівництва і
архітектури

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 № 15 від 24.11.2023 р.

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

Адреса редакції: 02000, м.Київ, проспект Повітрофлотський, 31, кім. 603б.

тел. +38 044 241-55-48, e-mail: motp@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, 2023

ЗМІСТ

<i>Галузеве машинобудування</i>	4
Олексій Приймаченко, Петро Чередніченко, Юрій Човнюк, Наталія Шудра Динамічна оптимізація навантажень, виникаючих при гальмуванні механізму пересування мостового крана: аналітичний підхід.....	4
Іван Назаренко, Євген Міщук Дослідження параметрів та режимів роботи вібродробарки.....	10
Микола Ручинський, Борис Корнійчук Дослідження та визначення основних параметрів віброударного режиму виробництва фундаментних блоків	18
Іван Назаренко, Сергій Орищенко Динаміка вібраційного грохота із врахуванням впливу сортувального матеріалу на його робочі параметри.....	25
Ігор Косминський, Ілля Санкін, Катерина Левчук Вибір стірлінг технології, як шлях до енергозбереження та скорочення використання традиційних енергоресурсів- минський	34
<i>Технологія захисту навколишнього середовища</i>	39
Сергій Шаманський, Леся Павлюх, Віктор Репета Методологічне забезпечення організаційно-технічних заходів з відбудови інфраструктури водовідведення на засадах екобезпеки	39
Olena Voloshkina, Iryna Korduba, Olena Zhukova The relationship global climate changes and the operation of open cooling systems of energy facilities of Ukraine	51

Галузеве машинобудування

УДК 621.4

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0201>

Олексій Приймаченко,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри Міського Будівництва,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5125-8472>
E-mail: prymachenko.ov@knuba.edu.ua

Петро Чередніченко,

доцент кафедри Міського Будівництва,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7161-661X>
E-mail: petro_che@ukr.net

Юрій Човнюк,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри Міського Будівництва,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0608-0203>
E-mail: ychovnyuk@ukr.net

Наталія Шудра,

ст. викладач кафедри Інженерної Геодезії,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5416-7680>
E-mail: shudra_n@ukr.net

ДИНАМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ НАВАНТАЖЕНЬ, ВИНИКАЮЧИХ ПРИ ГАЛЬМУВАННІ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕСУВАННЯ МОСТОВОГО КРАНА: АНАЛІТИЧНИЙ ПІДХІД

АНОТАЦІЯ. У роботі запропонована модель для визначення динамічних навантажень, які виникають при гальмуванні механізму пересування мостового крана. Методами математичної фізики, класичного варіаційного числення при застосуванні апарату розв'язку звичайних лінійних диференціальних рівнянь визначені аналітично закони руху механізму пересування вказаного крана, за яких динамічні навантаження у механізмі мінімізуються. Цей результат дає можливість здійснити конструктивні заходи для зниження рівня динамічної навантаженості крана.

Задля зниження динамічних навантажень при гальмуванні механізму пересування мостового крана запропоновані додаткові заходи, а саме: 1) регулювання сили гальмування крана; 2) зменшення маси візка й крана шляхом: а) застосування металокопункцій у вигляді ферм замість суцільних стінних; б) використання гнутих профілів для виготовлення металокопункцій; в) застосування легких сплавів; 3) зменшувати момент інерції ротора електродвигуна привода механізму пересування мостового крана шляхом: а) застосування кількох двигунів із сумарною потужністю, яка дорівнює потужності одного приводного двигуна, що знижує момент інерції ротора; б) використання двигунів з полегшеними роторами; 4) використовувати муфти зі змінною жорсткістю.

Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення і вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку систем гальмування механізмів пересування мостових кранів задля мінімізації динамічних навантажень у цих механізмах як на стадіях їх проектування, так і у режимах реальної експлуатації.

Ключові слова: динамічна оптимізація, мінімізація навантажень, механізми пересування, гальмування, мостові крани, рухомі маси, пружна ланка.

DYNAMIC OPTIMIZATION OF LOADS, OCCURRING DURING THE BRAKING OF AN OVERHEAD CRANE TRAVEL GEAR: AN ANALYTICAL APPROACH

ABSTRACT. The paper proposes a model for determining the dynamic loads arising during the braking of an overhead crane travel mechanism. By the methods of mathematical physics, classical variational calculus at application of the apparatus of the decision of the usual linear differential equations the laws of movement of the mechanism of movement of the specified crane at which dynamic loadings in the mechanism are minimized are analytically defined. This result gives an opportunity to carry out constructive measures for decrease in level of dynamic loading of the crane.

In order to reduce the dynamic loads during the braking of the bridge crane movement mechanism, additional measures have been proposed, namely: 1) regulation of crane braking force; 2) reduction of bogie and crane weight by: a) application of steel structures in the form of trusses instead of solid wall ones; b) use of bent profiles for manufacturing of steel structures; c) application of lighter alloys; 3) reduction of the moment of inertia of the electric motor rotor of the crane travel mechanism by: a) using several motors with total power equal to the power of one drive motor, which reduces the moment of inertia of the rotor; b) using motors with lightweight rotors; 4) using couplings with variable stiffness.

The results obtained in the work can be further used to refine and improve the existing engineering methods for calculating the braking systems of overhead crane travel mechanisms to minimize the dynamic loads in these mechanisms both at the stages of their design and in the modes of real operation.

Keywords: dynamic optimization, load minimization, movement mechanisms, braking, overhead cranes, moving masses, elastic link.

1. Постановка проблеми. Механізми пересування вантажопідйомних кранів (зокрема, мостових кранів) у періоди неусталеного руху (пуск чи зупинка) знаходяться під впливом динамічних навантажень. Ці навантаження виникають у зв'язку із наявністю у механізмах значних рухомих мас й досягають у порівнянні зі статичним навантаженнями великих значень.

У механізмах пересування найбільші маси мають: ротор двигуна, моторні та гальмівні муфти, елементи крана, які рухаються поступально й обертаються (візок чи кран, ходові колеса).

Встановлено [1], що біля 80% відмов вантажопідйомних машин у основному пов'язані з динамічними навантаженнями, які призводять до руйнування внаслідок втоми несучих металоконструкцій кранів і деталей механізмів, підвищеного зносу поверхонь тертя окремих деталей, появи неприпустимих залишкових деформацій і т. п. Тому визначення й урахування при проектуванні (мостових) кранів динамічних навантажень дозволяють підвищити надійність роботи кранів мостового типу.

Динамічні розрахунки необхідні задля визначення параметрів, які впливають на величину динамічних навантажень, й для розробки механізмів й крана в цілому з такими параметрами, котрі знижували б ці навантаження, збільшуючи при цьому довговічність металоконструкції та механізмів (мостового) крана.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Визначенню динамічних навантажень, виникаючих при гальмуванні механізму пересування кранів мостового типу присвячено багато робіт. Це, у першу чергу роботи М.С. Комарова [2], В.Ф. Гайдамаки [3], Н.А. Лобова [4], Л.Я. Будікова [5], С.І. Шевченка [6,7], В.С. Ловеїкіна та А.П. Нестерова [8], В.Ф. Семенюка та ін. [9]. У цих роботах використовуються багатомасові розрахункові схеми і, відповідно, системи диференціальних рівнянь, які описують рух мас моста, мас частин привода, що обертаються, маси візка, маси вантажу. Загальний розв'язок такої системи диференціальних рівнянь можливий лише при використанні чисельних методів розв'язку, що значно ускладнює

проведення аналізу впливу окремих параметрів крана на величину динамічних навантажень. Це ускладнює розробку конструктивних і технологічних заходів щодо зниження рівня динамічних навантажень крана та збільшення строку експлуатації його основних елементів: металоконструкції, ходових коліс, гальмівних пристроїв, підкранових рейок.

3. Мета роботи. Обґрунтувати модель руху механізму пересування мостового крана, котра враховує виникаючі при гальмуванні цього механізму динамічні навантаження і встановлення такого закону його руху, за якого вказані навантаження мінімізуються.

4. Матеріали та методи. Аналіз, виконаний у роботі [2], узагальнений у [9], показує, що у механізмі пересування мостових кранів найбільшими масами є: ротор двигуна та переміщувані частини крана. Передачі механізму: зубчасті колеса, вали, мають відносно малі маси. Тому розрахункову схему механізму пересування можна подати у вигляді двох мас, які з'єднані між собою пружною ланкою. Пружна ланка представляє собою механічні передачі від двигуна до елемента, який безпосередньо переміщує кран, тобто вали (головним чином), зубчасті колеса, муфти.

У даній розрахунковій схемі не враховується наступне:

- 1) вплив розгойдування вантажу при гальмуванні;
- 2) наявність демпфування у приводі й металоконструкції крана;
- 3) наявність зазорів у приводі.

Прийнято, що сила опору пересуванню постійна, а пробуксовування коліс відсутнє.

Рух мас цієї моделі системи пересування крана описується наступною системою диференціальних рівнянь [9] (1) та (2):

$$m_1 \times \ddot{x}_1 - c \times (x_2 - x_1) = -P_t; \quad (1)$$

$$m_2 \times \ddot{x}_2 + c \times (x_2 - x_1) = -W, \quad (2)$$

де: m_1 – приведена маса частин двигуна, які обертаються (тобто це – ротор, моторні та гальмівні муфти); m_2 – приведена маса рухомих елементів крана (рухаються поступально) та тих елементів, котрі обертаються (візок, кран, ходові колеса); x_1 – координата маси m_1 ; x_2 – координата маси m_2 ; c – приведена жорсткість елементів передачі (головним чином валів) механізму пересування мостового крана; P_t – сила гальмування; W – статичний опір пересуванню візка чи крана.

Сила, яку сприймає пружна ланка механізму пересування, буде дорівнювати:

$$F = c \times (x_2 - x_1). \quad (3)$$

Для визначення величини $S = (x_2 - x_1)$ використаємо методику М.С. Комарова [2] і перетворимо систему диференціальних рівнянь (1) та (2) у одне диференціальне рівняння [9]. Для цього помножимо рівняння (1) на m_2 , а рівняння (2) на m_1 , а потім віднімемо від другого рівняння перше. Після перетворень маємо:

$$(\ddot{x}_2 - \ddot{x}_1) + c \times \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 \times m_2} \times (x_2 - x_1) = \frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2}. \quad (4)$$

Або:

$$\ddot{s} + p^2 \times s = \frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2}, \quad p^2 = \frac{(m_1 + m_2)}{m_1 \times m_2} \times c. \quad (5)$$

Розв'язок (5) шукаємо у наступному виді:

$$s(t) = A \times \cos pt + B \times \sin pt + D, \quad D = \frac{P_t \times m_2 - W \times m_1}{c \times (m_1 + m_2)}. \quad (6)$$

Початкові умови при $t=0$ приймемо наступні:

$$s|_{t=0} = 0; \quad \dot{s}|_{t=0} = 0. \quad (7)$$

Підставляючи початкові умови у рівняння (6), знайдемо:

$$A = -\frac{P_t \times m_2 - W \times m_1}{c \times (m_1 + m_2)}, \quad B = 0. \quad (8)$$

Після підстановки значень A та B у рівняння (6), маємо:

$$s(t) = \frac{(P_t \times m_2 - W \times m_1)}{c \times (m_1 + m_2)} \times (1 - \cos pt) = \frac{(P_t \times m_2 - W \times m_1)}{c \times (m_1 + m_2)} \times 2 \times \sin^2 \left(\frac{p \times t}{2} \right). \quad (9)$$

Отже, вираз (9) дозволяє аналітично визначити динамічні навантаження, що виникають при гальмуванні механізму пересування мостового крана, й розробити конструктивні заходи щодо зниження рівня динамічної завантаженості крана.

З (9) випливає, що сила, яку сприймає пружна ланка механізму пересування, із урахуванням (9) буде дорівнювати:

$$F = c \times s = \frac{(P_t \times m_2 - W \times m_1)}{(m_1 + m_2)} \times 2 \times \sin^2 \left(\frac{p \times t}{2} \right). \quad (10)$$

Видно, що сила F має коливний характер і приймає своє максимальне значення F_{\max} :

$$F_{\max} = \frac{2 \times (P_t \times m_2 - W \times m_1)}{(m_1 + m_2)}. \quad (11)$$

у моменти часу t_n :

$$t_n = \left\{ (-1)^n \times \pi + 2 \times n \times \pi \right\} \times \frac{1}{p}, \quad n \in \mathbb{N}. \quad (12)$$

Крім того, у моменти часу t_j :

$$t_j = \frac{2 \times j \times \pi}{p}, \quad j \in \mathbb{N}, \quad (13)$$

F приймає мінімальне (нульове) значення, тобто:

$$F(t_j) = F_{\min} = 0. \quad (14)$$

Таким чином:

$$\begin{cases} F_{\max} = F(t_n) = \frac{2 \times (P_t \times m_2 - W \times m_1)}{(m_1 + m_2)}; \\ F_{\min} = F(t_j) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

Такий режим руху механізму пересування мостового крана є ризикованим і може призводити до аварійних ситуацій, пов'язаних з надлишковим перенапруженням пружної ланки механізму.

Встановимо закон руху $s(t)$, за якою F приймає мінімальні значення на часовому проміжку, де механізм пересування крана гальмує. Нехай тривалість процесу гальмування складає τ_r . З'ясуємо умови, за яких реалізується рух пересувного механізму мостового крана з критерієм якості наступного виду:

$$I = \sqrt{\frac{1}{\tau_r} \times \int_0^{\tau_r} (F)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{\tau_r} \times \int_0^{\tau_r} [c \times s(t)]^2 dt} \Rightarrow \min. \quad (16)$$

Враховуючи рівняння (5) критерій якості руху пересувного механізму крана мостового типу можна подати у вигляді:

$$I = \sqrt{\frac{1}{\tau_r} \times \int_0^{\tau_r} \left\{ \left(\frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2} \right) \cdot \ddot{s} \right\}^2 \times \frac{c^2}{p^4} dt} \Rightarrow \min. \quad (17)$$

Нехай $P_t = \text{const}$, $W = \text{const}$, тоді необхідною умовою реалізації критерію (17) є рівняння Ейлера-Пуассона:

$$s^{(iv)} = 0. \quad (18)$$

Розв'язок рівняння (18) шукаємо у вигляді сплайна по t третього порядку:

$$s(t) = a_0 + a_1 \times t + a_2 \times t^2 + a_3 \times t^3. \quad (19)$$

Для визначення констант (a_0, a_1, a_2, a_3) використаємо наступні термінальні умови:

$$s|_{t=0} = 0; \dot{s}|_{t=0} = 0; \ddot{s}|_{t=0} = \frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2}; \dot{s}|_{t=\tau_r} = 0. \quad (20)$$

Тоді, враховуючи (19) і (20), матимемо:

$$a_0 = 0; a_1 = 0; a_2 = \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2} \right\}; a_3 = \left(-\frac{2}{3} \right) \times \frac{a_2}{\tau_r} = \left(-\frac{1}{3 \times \tau_r} \right) \times \left(\frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2} \right). \quad (21)$$

Отже, закон руху механізму пересування крана $s(t)$, за якого реалізується критерій якості (16), (17) руху, має наступний вид:

$$s(t) = \frac{1}{2} \times \left\{ \frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2} \right\} \times t^2 - \frac{1}{3 \times \tau_r} \times \left(\frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2} \right) \times t^3. \quad (22)$$

Відповідно до (22) $F(t)$ приймає вигляд:

$$F(t) = c \times s(t) = \frac{c}{2} \times \left\{ \frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2} \right\} \times t^2 - \frac{c}{3 \times \tau_r} \times \left(\frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2} \right) \times t^3. \quad (23)$$

На відміну від $F(t)$ (10) $F(t)$ (23) носить «плавний» характер залежності від часу (t). Свого максимального значення $F(t)$ (23) набуває при $t = \tau_r$. Ця величина складає:

$$F(t)|_{t=\tau_r} = F_{max} = \frac{1}{6} \times c \times \tau_r^2 \times \left(\frac{P_t}{m_1} - \frac{W}{m_2} \right) = \frac{1}{6} \times c \times \left(\frac{P_t \times m_2 - W \times m_1}{m_1 \times m_2} \right) \times \tau_r^2. \quad (24)$$

Якщо скласти співвідношення F_{max} (10) до F_{max} (24), то видно, що воно дорівнює:

$$N = \frac{F_{max}(10)}{F_{max}(24)} = \frac{12}{p^2 \times \tau_r^2}. \quad (25)$$

Зменшуючи величину τ_r (за рахунок, наприклад, використання в управлінні процесом гальмування мехатронних систем), можна досягти реалізації нерівності:

$$\frac{12}{p^2 \times \tau_r^2} > 1. \quad (26)$$

Це означає, що максимальні навантаження на механізм пересування мостового крана зменшаться.

5. Висновки. 1. Обґрунтовані фізико-механічна та математична моделі, які адекватно описують процес гальмування механізму пересування мостового крана.

2. Встановлений закон руху механізму пересування крана мостового типу, за якого мінімізуються динамічні навантаження на пружну ланку цього механізму у процесі його гальмування до повної зупинки.

3. Задля зниження динамічних навантажень при гальмуванні механізму пересування крану необхідно також: 1) регулювати силу гальмування крана; 2) зменшити масу візка та крана шляхом: а) застосування металокопункцій у вигляді ферм замість суцільних стінних; б) використання гнутих профілів для виготовлення металокопункцій; в) застосування легких сплавів; 3) зменшувати момент інерції ротора електродвигуна привода механізму пересування шляхом: а) застосування кількох двигунів із сумарною потужністю, яка дорівнює потужності одного приводного двигуна, що знижує момент інерції ротора; б) використання двигунів з полегшеними роторами; 4) використовувати муфти зі змінною жорсткістю.

4. Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення і вдосконалення існуючих інженерних методів розрахунку параметрів механізмів пересування кранів мостового типу з метою мінімізації діючих на них динамічних навантажень як на стадії проектування, так і у режимах їх реальної експлуатації.

Список використаних джерел:

1. *М.П. Александров, Л.Н. Колобов, Н.А. Лобов и др.* Грузоподъёмные машины. – М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
2. *М.С.Комаров.* Динамика грузоподъёмных машин. – М. – К.: Машгиз 1962. 267с.
3. *В.Ф. Гайдамака.* Грузоподъёмные машины. – Киев: Вища школа, 1989. 328 с.
4. *Н.А. Лобов.* Динамика передвижения кранов по рельсовому пути. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 232 с.
5. *Л.Я. Будилов.* Многопараметрический анализ динамики грузоподъёмных кранов мостового типа. – Луганск: Издательство СЛУ им. В. Даля, 2003. 201 с.
6. *С.І. Шевченко.* Зниження динамічних навантажень кранів мостового типу шляхом застосування гальмових обладнань із самопідсиленням. Науково-технічний та виробничий журнал «Підйомно-транспортна техніка», 2008. Вип. №4. – Дніпропетровськ: Видавництво ДІІТ. С. 38-46.
7. *В.Н. Старченко, С.І. Шевченко, Л.І. Кобзева, Я.В. Мушкаєв, О.Л. Ігнат'єв.* Підвищення ефективності роботи мостового крана в процесі гальмування. Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля, 2008. Вип. №5 (123). С. 112-117.
8. *В.С. Ловейкін, А.П. Нестеров.* Динамічна оптимізація підйомних машин. – Харків: ХНАДУ, 2002. 291 с.
9. *В.Ф. Семенюк, А.Н. Вудвуд.* Аналитическое определение динамических нагрузок, возникающих при торможении механизма передвижения мостового крана. Підйомно-транспортна техніка, 2017. Вип. №2. С. 42-46.

References:

1. M.P. Aleksandrov, L.N. Kolobov, N.A. Lobov y dr. Hruzopodymnye mashyny. – М.: Mashynostroeniye, 1985. 400 s. {In Russian}.
2. M.S.Komarov. Dynamyka hruzopodymnykh mashyn. – М. – К.: Mashhyz 1962. 267s. {In Russian}.
3. V.F. Haidamaka. Hruzopodymnye mashyny. – Kyev: Vyshcha shkola, 1989. 328 s. {In Russian}.
4. N.A. Lobov. Dynamyka peredvyzheniya kranov po relsovomu puty. – М.: Yzdatelstvo MHTU ym. N.E. Baumana, 2003. 232 s. {In Russian}.
5. L.I. Budykov. Mnohoparametrycheskyi analiz dynamyky hruzopodymnykh kranov mostovoho typu. – Luhansk: Yzdatelstvo SNU im. V. Dalia, 2003. 201 s. {In Russian}.
6. S.I. Shevchenko. Znyzhennia dynamichnykh navantazhen kraniv mostovoho typu shliakhom zastosuvannia halmovykh obladnan iz samopidsylenniam. Naukovo-tekhnichnyi ta vyrobnychiy zhurnal «Pidiomno-transportna tekhnika», 2008. Vyp. №4. – Dnipropetrovsk: vydavnytstvo DIIT. S. 38-46. {In Ukrainian}.
7. V.N. Starchenko, S.I. Shevchenko, L.I. Kobzeva, Ya.V. Mushkaiev, O.L. Ihnatev. Pidvyshchennia efektyvnosti roboty mostovoho kрана v protsesi halmuvannia. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnogo universytetu im. V. Dalia, 2008. Vyp. №5 (123). S. 112-117. {In Ukrainian}.
8. V.S. Loveikin, A.P. Nesterov. Dynamichna optymizatsiia pidiomnykh mashyn. – Kharkiv: KhNADU, 2002. 291 s. {In Ukrainian}.
9. V.F. Semeniuk, A.N. Vudvud. Analytycheskoe opredelenye dynamycheskykh nahruzok, voznykaiushchykh pry tormozhenyy mekhanyzma peredvyzheniya mostovoho kрана. Pidiomno-transportna tekhnika, 2017. Vyp. №2. S. 42-46. {In Russian}.

УДК 621.926.2

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0201>**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

Свген 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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІБРОДРОБАРКИ

АНОТАЦІЯ. Одним із основних напрямків дослідження машин для виробництва будівельних матеріалів є зниження енергозатрат. Вирішення проблеми, пов'язаної з визначенням затрат енергії, представляє доволі складну задачу, так як затрати енергії залежать від цілого ряду факторів, які змінюються в процесі роботи машини і важко піддаються точному описанню. Одним із напрямків розвитку машин для виробництва будівельних матеріалів є створення резонансних вібраційних машин. На основі аналізу останніх досліджених встановлено перспективність вібраційних щокочових дробарок. Правильний підбір параметрів, які забезпечуватимуть роботу дробарки в сталому резонансному режимі, дасть можливість зменшити енергозатрати на подрібнення. З цією метою в роботі представлено дослідження динамічних параметрів вібраційної щокочової дробарки. Ефективність роботи досліджуваної вібраційної дробарки двосторонньої дії забезпечується в резонансному режимі при синхронному налаштуванні руху першої і третьої маси і протифазному русі другої маси. Для цього жорсткість пружних зв'язків c_1 та c_2 розраховується з умови резонансу приведених мас m_{23} та m_{12} відповідно, а жорсткість опорних пружин з умови віброізоляції. Представлена фізична модель дробарки та наведені рівняння руху коливальних мас з матеріалом та без матеріалу в камері дроблення. Отримано графіки впливу на амплітуду коефіцієнту регулювання жорсткості по частоті. На основі рівнянь руху побудовані амплітудо-частотні характеристики для відповідних власних кутових частот (резонансних частот). Великий вплив на амплітуду коливань мають маси коливальних частин дробарки. Раціонально підібрані співвідношення коливальних мас забезпечують потрібний режим роботи (синфазний, протифазний) та забезпечують потрібні амплітуди коливань цих мас. Для заданих вхідних умов визначено раціональні межі співвідношень коливальних мас для забезпечення відповідних частотних режимів. Грунтуючись на аналізі амплітудо-частотних характеристик були побудовані графіки амплітуд переміщення коливальних мас дробарки. Дано рекомендації по вибору ефективних частотних режимів.

Ключові слова: Дробарка, енергоефективність, частота, жорсткість, амплітуда.

RESEARCH OF PARAMETERS AND MODES OF THE VIBRATION CRUSHER

ABSTRACT. One of the main directions of research on machines for the production of building materials is the reduction of energy consumption. Solving the problem related to the determination of energy consumption is a rather difficult task, since energy consumption depends on a number of factors that change during the operation of the machine and are difficult to accurately describe. One of the areas of development of machines for the production of construction materials is the creation of resonant vibration machines. Based on the analysis of the latest researches, the prospects of vibrating jaw crushers have been established. The correct selection of parameters that will ensure the operation of the crusher in a stable resonance mode will make it possible to reduce energy costs for crushing. For this purpose, the study of the dynamic parameters of the vibrating jaw crusher is presented in the paper. The efficiency of the double-acting vibratory crusher under study is ensured in the resonance mode with the synchronous adjustment of the movement of the first

and third masses and the counterphase movement of the second mass. For this, the stiffness of the elastic connections c_1 and c_2 is calculated from the condition of resonance of the reduced masses m_{23} and m_{12} , respectively, and the stiffness of the support springs from the condition of vibration isolation. The physical model of the crusher is presented and the equations of motion of oscillating masses with and without material in the crushing chamber are given. Graphs of the effect on the amplitude of the stiffness adjustment coefficient by frequency were obtained. Based on the equations of motion, the amplitude-frequency characteristics for the corresponding natural angular frequencies (resonance frequencies) are constructed. The mass of the oscillating parts of the crusher has a great influence on the amplitude of oscillations. Rationally selected ratios of oscillating masses provide the required operating mode (in-phase, anti-phase) and provide the required amplitudes of oscillations of these masses. For the given input conditions, the rational limits of the ratios of the oscillating masses are determined to ensure the corresponding frequency regimes. Based on the analysis of the amplitude-frequency characteristics, graphs of the amplitudes of the movement of the oscillating masses of the crusher were constructed. Recommendations for choosing effective frequency modes are given.

Keywords: Crusher, energy efficiency, frequency, rigidity, amplitude.

1. Постановка проблеми. Одним із основних напрямків дослідження машин для виробництва будівельних матеріалів є зниження енергозатрат [1]. Вирішення проблеми, пов'язаної з визначенням затрат енергії, представляє доволі складну задачу, так як затрати енергії залежать від цілого ряду факторів, які змінюються в процесі роботи машини і важко піддаються точному описанню [2],[3].

В свою чергу будівельна промисловість з кожним днем потребує нових методів та способів виробництва будівельних матеріалів [5]. Розглядаючи дробильне обладнання для подрібнення гірських порід, стає зрозумілим, що ця галузь виробництва потребує впровадження нових енергоефективних методів подрібнення [6]. Одним із таких напрямків є резонансні вібраційні дробильні машини [7].

До основних параметрів механічного режиму вібродробарки відносяться маса, швидкість та жорсткість [8], [9]. Правильний підбір параметрів, які забезпечуватимуть роботу дробарки в оптимальному режимі, дасть можливість зменшити енергозатрати на подрібнення [10], [11].

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі аналізу останніх досліджених встановлено перспективність вібраційних щоккових дробарок [1], [2], [12]. Конструктивні схеми вібраційних щоккових дробарок умовно можна розділити на 5 груп [4]: 1) Інерційні щоккові дробарки з одною рухомою щокою; 2) вібраційні щоккові дробарки з двома рухомими щоками; 3) вібраційні щоккові дробарки з важким корпусом і маятником; 4) щоккові дробарки з вібратором на корпусі; 5) вібраційні щоккові дробарки з хвилеводами. Найбільш дослідженою групою вібродробарок є вібраційні щоккові дробарки з двома рухомими щоками [5],[7],[11]. До не перспективних груп відноситься перша – інерційні щоккові дробарки з одною рухомою щокою. Це пояснюється тим, що використання інерційного привода в дробарках з кінематичним приводом знижує надійність останнього. Одною з перспективних але малодосліджених груп є вібраційні щоккові дробарки з важким корпусом і маятником [2],[5].

3. Мета роботи. Дослідити ефективність роботи вібраційної резонансної щоккової дробарки двохсторонньої дії на різних частотних режимах та встановити раціональні значення її основних параметрів.

4. Матеріали та методи. Ефективність роботи досліджуваної вібродробарки забезпечується в резонансному режимі при синхронному налаштуванні руху першої і третьої маси і протифазному русі другої маси. Схема вібраційної щоккової дробарки представлена на рис. 1. Вібродробарка складається з трьох мас, які попарно з'єднані пружними елементами 4 і 9. Перша маса дробарки включає в себе рухому плиту 3 до якої жорстко прикріплений вібратор 2. Друга маса включає збірну раму 5 до якої жорстко або шарнірно кріпляться нерухомі дробильні плити 8. Рама 5 дробарки опирається на станину 1 через гумові пружні елементи 10. Третя маса (ударник) включає в себе рухому плиту 7 до якої з обох боків жорстко кріпляться дробильні плити 6. Монтується третя маса в середині рами дробарки і опирається на спеціальні роликові опори 11.

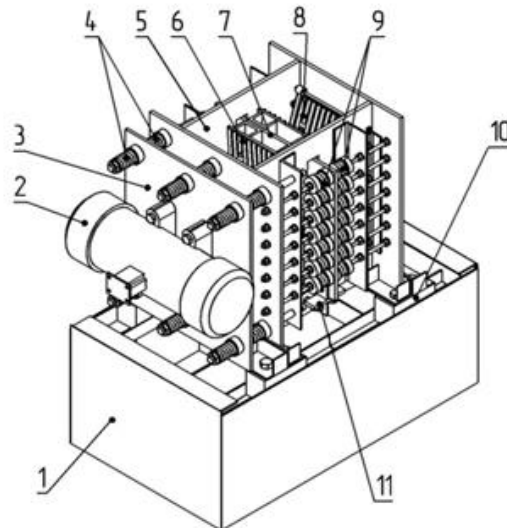


Рис. 1. Модель резонансної вібраційної щоквої дробарки двосторонньої дії
 Fig. 1. Model of a resonant vibrating jaw crusher with two-way action

Діапазон частот при яких робота машини буде найбільш ефективною був заданий з врахуванням системи рівнянь:

рівняння руху мас без матеріалу в камері дроблення:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + 2x_1 c_1 - x_2 c_1 = F_0 \sin \omega t; \\ m_2 \ddot{x}_2 + x_2 c_1 - x_1 c_1 + 2c_2 x_2 - \\ 2c_2 x_3 + x_2 c_{оп} = 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + 2c_2 x_3 - 2c_2 x_2 = 0; \\ F_{др} \leq c_2 x_n; \\ x_1 > 0; x_3 > 0; x_2 < 0; \\ x_2 + x_3 = \xi * D_{max}. \end{cases} \quad (1)$$

рівняння руху мас за наявності матеріалу в камері подрібнення:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + 2x_1 c_1 - x_2 c_1 = F_0 \sin \omega t; \\ (m_2 + km_m) \ddot{x}_2 + x_2 c_1 - x_1 c_1 + \\ + 2c_2 x_2 - 2c_2 x_3 + x_2 c_{оп} = 0; \\ (m_3 + km_m) \ddot{x}_3 + 2c_2 x_3 - \\ - 2c_2 x_2 = 0; \\ F_{др} \leq c_2 x_n; \\ x_1 > 0; x_3 > 0; x_2 < 0; \\ x_2 + x_3 = \xi * D_{max}. \end{cases} \quad (2)$$

При русі дробарки з матеріалом в камері подрібнення, робоче середовище враховуємо за рахунок приєднаної маси до другої і третьої маси машини, які безпосередньо взаємодіють з матеріалом

Жорсткість пружних зв'язків c_2 та c_1 була розрахована з умови резонансу приведених мас m_{23} та m_{12} відповідно, а жорсткість опорних пружин з умови віброізоляції.

В загальному вигляді жорсткість коливальної системи можна визначити з рівняння:

$$c_{ij} = (\omega_0 n)^2 \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}, \quad (3)$$

де ω_0 - власна кутова частота коливань (резонансна частота); n – коефіцієнт регулювання жорсткості по частоті.

5. Результати. Підставляючи відповідні значення жорсткостей в рівняння амплітуд переміщень мас дробарки, отримаємо графіки залежності амплітуди від коефіцієнта n рис.2, для відповідних частотних режимів.

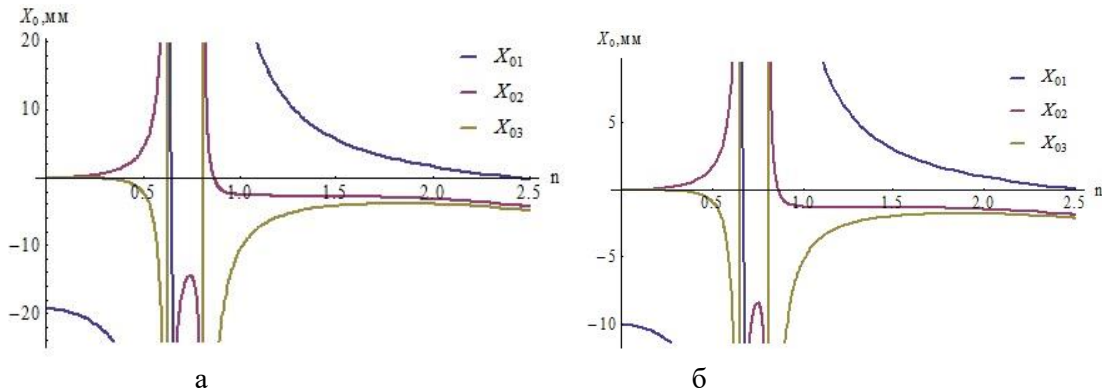


Рис.2. Графік залежності амплітуди від коефіцієнта n , при наступних частотних режимах:

а) $\omega_0 = 75,36$ рад/с; б) $\omega_0 = 104,667$ рад/с

Fig. 2. Graph of the dependence of the amplitude on the coefficient n , at the following frequency modes:

а) $\omega_0 = 75,36$ rad/s; б) $\omega_0 = 104,667$ rad/s

Великий вплив на амплітуду коливань мають маси коливальних частин дробарки. Раціонально підібрані співвідношення коливальних мас забезпечують потрібний режим роботи (синфазний, протифазний) та забезпечують потрібні амплітуди коливань цих мас. Графіки для визначення раціонального співвідношення між другою та третьою масою дробарки зображені на рис. 3, а між першою та другою на рис. 4.

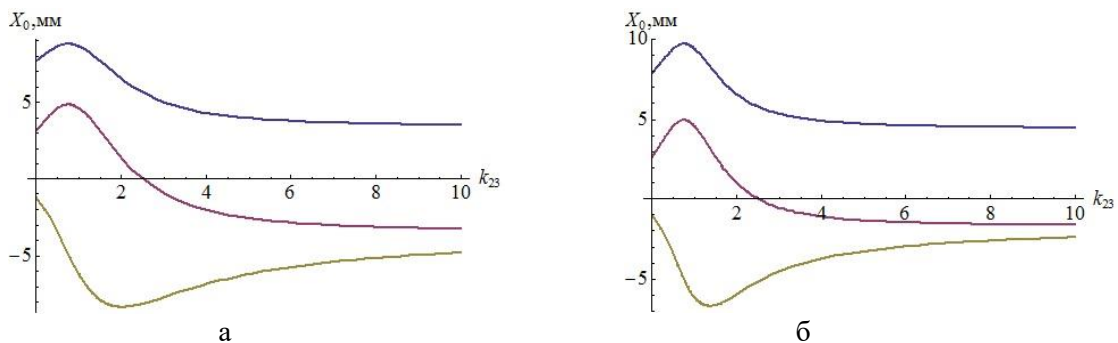


Рис.3. Графіки залежностей зміни амплітуди від коефіцієнта співвідношення мас k_{23} , при різних частотних діапазонах: а) $\omega_0 = 75,36$ рад/с; б) $\omega_0 = 104,667$ рад/с

Fig. 3. Graphs of dependences of the amplitude change on the mass ratio coefficient k_{23} , at different frequency ranges: а) $\omega_0 = 75,36$ rad/s; б) $\omega_0 = 104,667$ rad/s

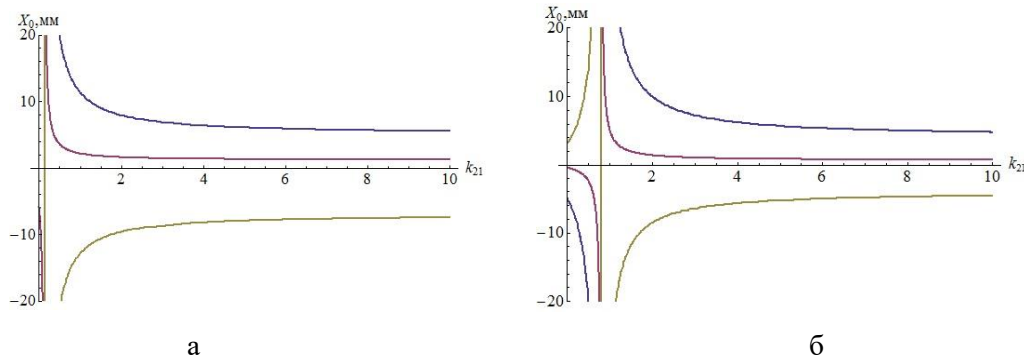


Рис.4. Графіки залежностей зміни амплітуди від коефіцієнта співвідношення мас k_{21} , при різних частотних діапазонах: а) $\omega_0 = 75,36$ рад/с; б) $\omega_0 = 104,667$ рад/с.

Fig. 4. Graphs of dependences of the amplitude change on the mass ratio coefficient k_{21} , at different frequency ranges: а) $\omega_0 = 75,36$ rad/s; б) $\omega_0 = 104,667$ rad/s

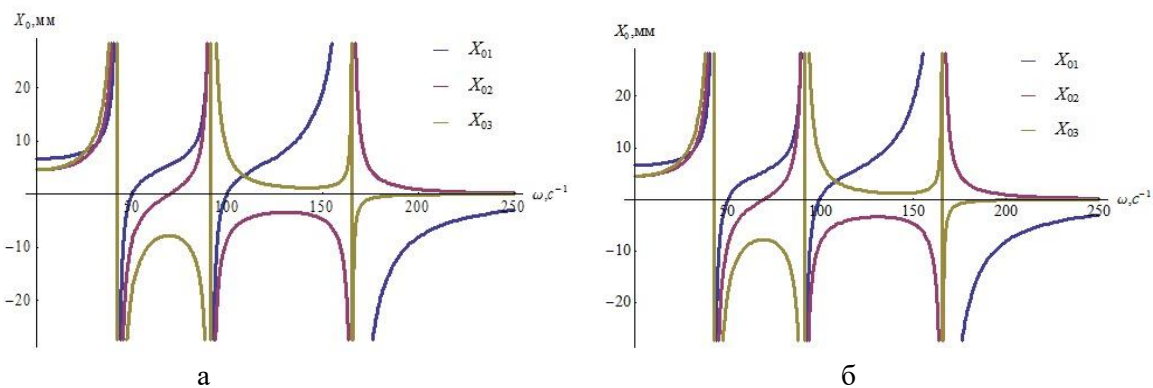


Рис.5. Амплітудно-частотна характеристика вібраційної щоквої дробарки при $\omega_0 = 75,36$ рад/с: а) робота дробарки без матеріалу; б) робота дробарки з матеріалом.

Fig. 5. Amplitude-frequency characteristics of the vibrating jaw crusher at $\omega_0 = 75,36$ rad/s: а) crusher operation without material; б) operation of the crusher with the material.

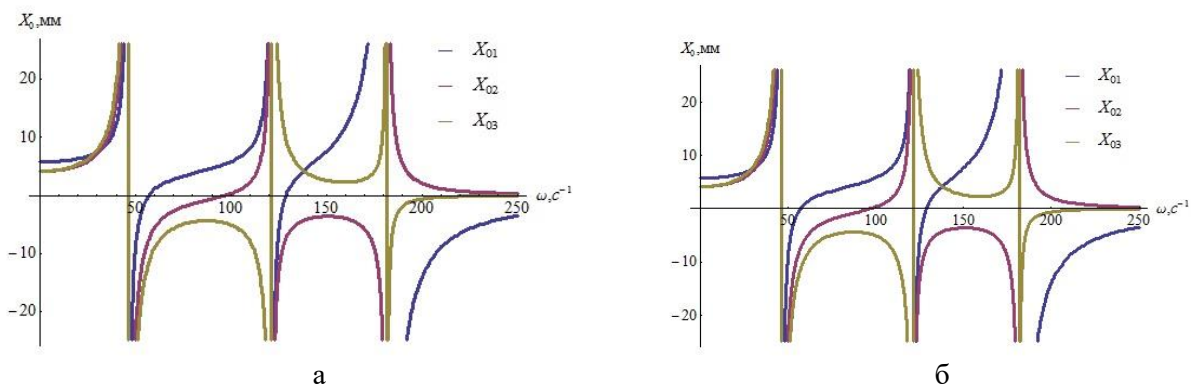


Рис.6. Амплітудно-частотна характеристика вібраційної щоквої дробарки при $\omega_0 = 104,667$ рад/с: а) робота дробарки без матеріалу; б) робота дробарки з матеріалом

Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of the vibrating jaw crusher at $\omega_0 = 75,36$ rad/s: а) crusher operation without material; б) operation of the crusher with the material

Для побудови графіків були використані наступні логічні перетворення [3]:

$$m_2 = \frac{N_c}{1 + 1/k_b}; m_3 = \frac{N_c}{1 + k_b}. \quad (4)$$

де N_c – сума другої та третьої маси системи; k_b – коефіцієнт співвідношення мас. Знаючи всі невідомі параметри рівнянь руху було побудовано графіки залежності амплітуди переміщення дробильних плит від частоти зміни збудовального зусилля рис.2.

При побудові графіків рис. 5, 6 значення коефіцієнтів n , k_{23} та k_{21} приймалися в допустимих межах, визначених раніше.

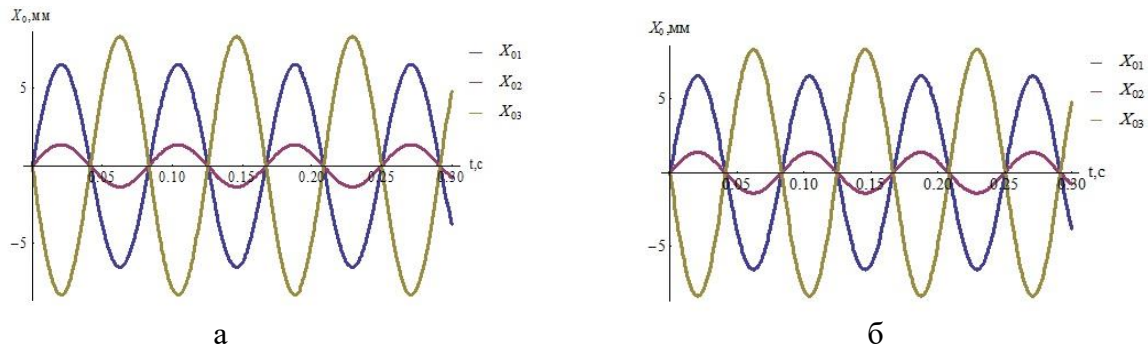


Рис.7. Графік амплітуд переміщення мас ($\omega_0 = 75,36$ рад/с):

а) робота дробарки без матеріалу; б) робота дробарки з матеріалом.

Fig. 7. The graph of amplitudes of mass movement ($\omega_0 = 75,36$ rad/s):

a) crusher operation without material; b) operation of the crusher with the material

Грунтуючись на аналізі амплітудо-частотних характеристик були побудовані графіки амплітуд переміщення коливальних мас дробарки рис. 7, 8.

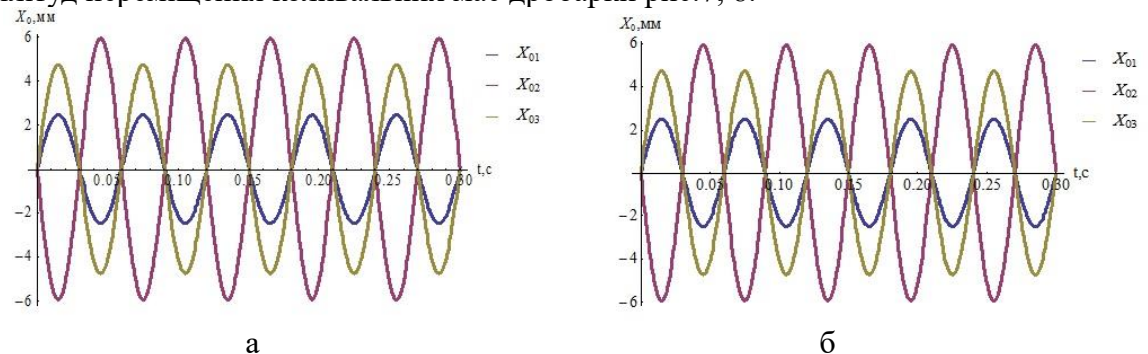


Рис.8. Графік амплітуд переміщення мас ($\omega_0 = 104,667$ рад/с):

а) робота дробарки без матеріалу; б) робота дробарки з матеріалом.

Fig. 8. The graph of amplitudes of mass movement ($\omega_0 = 104,667$ rad/s):

a) crusher operation without material; b) operation of the crusher with the material

6. Висновки. Рациональне значення коефіцієнта n знаходиться в межах $0,6 \leq n \leq 1$. При збільшенні значення коефіцієнту ($1 \leq n \leq 2,5$) ефективний діапазон роботи дробарки звужується та зміщується в сторону високих частот. Графіки рис. 2 засвідчують, що жорсткість пружних зв'язків дробарки забезпечує її ефективну роботу в зарезонансному та в околорезонансному режимі, а саме між другим та третім резонансами. При значенні коефіцієнта $0,6 \leq n \leq 1$, амплітуди мас мають найбільші значення, і зменшуються з наближенням n до 1.4. Амплітуда першої маси досягає нульового значення в околі точки $n = 2.52$.

З графіків рис. 3, були зроблені наступні висновки. При частоті коливань $\omega_0 = 75,36$ рад/с, значення амплітуди третьої маси досягає максимуму в околі точки $k_{23} = 2$, а амплітуди першої та другої маси досягають максимуму в околі точки $k_{23} = 0,8$. Із збільшенням значення резонансної частоти дані діапазони зміщуються по осі абсцис в сторону 0. Так при резонансній частоті $\omega_0 = 104,667$ рад/с, максимальне значення амплітуди третьої маси досягається в околі точки $k_{23} = 1.3$. А максимальні значення амплітуд першої та другої маси знаходяться в околі точки $k_{23} = 0,75$.

Найбільші значення амплітуди третьої маси для відповідних резонансних частот знаходяться в околі наступних точок рис.4: $\omega_0 = 75,36$ рад/с – $0,1 < k_{23} \leq 4$; $\omega_0 = 104,667$ рад/с – $0 <$

$k_{21} \leq 4$. Амплітуда другої маси є більш пологою ніж амплітуди третьої та першої мас. Стрімке зростання амплітуди другої маси спостерігається при проходженні системи через резонанс. Максимальних значень амплітуда першої маси досягає в тому ж діапазоні, що і третя маса. При збільшенні коефіцієнта $k_{21} \geq 4,5$, амплітуди коливання першої та другої маси змінюються незначно.

Ефективний режим роботи дробарки реалізується в зоні другого резонансу та в діапазоні між другим та третім резонансом, рис. 5-6.

При підвищенні розрахункового значення резонансної частоти колових коливань ω_0 (3) діапазон ефективної роботи вібраційної шоквої дробарки зміщується у бік збільшення частоти;

Ефективні діапазони роботи дробарки при значеннях жорсткостей системи, які були розраховані за відповідних резонансних частотах власних коливань ω_0 (3) є наступними:

- $\omega_0 = 75,36$ рад/с: 1) 70 рад/с $< \omega < 91$ рад/с, 2) 100 рад/с $< \omega < 180$ рад/с;
- $\omega_0 = 104,667$ рад/с: 1) 97 рад/с $< \omega < 121$ рад/с, 2) 129 рад/с $< \omega < 200$ рад/с.

Для забезпечення ефективної роботи дробарки при значеннях жорсткостей системи, які були розраховані за умови $\omega_0 = 104,667$ рад/с (3), в діапазонах нижчих частот ω потрібно підвищувати маси коливальних частин машини. Збільшені маси не повинні перевищувати допустимі межі, перевищення яких призведе до економічної недоцільності даної конструкції машини.

Проведені дослідження засвідчили ефективність робочого процесу подрібнення в камері вібраційної дробарки.

Найбільших переміщень друга та третя маси набувають в діапазоні $104,667$ рад/с $< \omega < 157$ рад/с, рис. 9-10. При наближенні частоти до третього резонансу амплітуда першої маси стрімко зростає, що підтверджується графіком. При роботі дробарки на частотах $69,08$ рад/с $< \omega < 91,06$ рад/с (рис. 9 -10), перша та друга маси рухаються в фазі, а третя маса навпаки в протифазі. Робота дробарки в даному режимі не є ефективною.

Проведені експериментальні дослідження засвідчили ефективність робочого процесу вібродробарки та незначну відмінність від теоретичних досліджень (15-16%).

Список використаних джерел:

1. *Drzymala, J.* (2007) Mineral Processing, Foundations of theory and practice of minerallurgy, Oficyna Wydawnicza PWR. ISBN 978-83-7493-362-9.
2. *Блохин В.С.* (2006) Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов: Учебное пособие. ч.1./ В.С.Блохин, В.И.Большаков, Н.Г.Малич // Днепропетровск: ИМА-пресс, – 404 с.
3. *Vasiliev, L. M. and Vasiliev, D. L. and Malich, M. G.* (2021) Modeling The Process Of Disintegration Of Solid Materials By Asymmetric Loading In Crushing Machines In Order To Find Ways To Reduce Energy Costs. Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions. pp. 457- 473. doi: <https://doi.org/10.31713/m1028> .
4. *Дедов О.П.* (2009) Створення резонансної гідравлічної вібро-трамбівки для ущільнення ґрунтів : Дис. канд.тех.наук. / О.П.Дедов. – Київ.
5. *Mishchuk, Y., Nazarenko, I., Mishchuk, D., Ruchynskiy, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezovyi, M., & Shatrov, R.* Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7(112), 41–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
6. *Балака М., Міщук Д., Паламарчук Д.* Сучасні уявлення про механізм зносу протекторних гум. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 2021. Вип. 98. С. 30–36. DOI: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.98.0302>.
7. *Назаренко І.І.* Прикладні задачі теорії вібраційних систем. Навчальний посібник (2-е видання) / І.І. Назаренко. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2010. – 440 с.
8. *Nazarenko, I., Dedov, O., Bernyk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A. et. al.* (2020). Determining the regions of stability in the motion regimes and parameters of vibratory machines for

- different technological purposes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (108)), 71–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>.
9. Nesterenko, M., Nazarenko, I., Molchanov, P. (2018). Cassette Installation with Active Working Body in the Separating Partition. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.2), 265. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14417>.
 10. Bernyk, I., Luhovskyi, O., Nazarenko, I. (2018). Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation. *Materiali in Tehnologije*, 52 (4), 465–468. doi: <https://doi.org/10.17222/mit.2017.021>.
 11. Fladvad, M., Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering*, 151, 106338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338>.
 12. Ciężkowski, P., Maciejewski, J., Bąk, S. (2017). Analysis of Energy Consumption of Crushing Processes – Comparison of One-Stage and Two-Stage Processes. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39 (2), 17–24. doi: <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0012>.

References:

1. Drzymala, J. (2007) *Mineral Processing, Foundations of theory and practice of minerallurgy*, Oficyna Wydawnicza PWR. ISBN 978-83-7493-362-9.
2. Blohin, V.S., Bolshakov, V.I., Malich, N.G. (2006). *Osnovnye parametry tehnologicheskikh mashin. Mashiny dlja dezintegracii tverdyh materialov. Uchebnoe posobie. ch.I. [Basic parameters of technological machines. Machines for the disintegration of solid materials. Textbook. Part 1]. Dnepropetrovsk: IMApress.*
3. Vasiliev, L. M. and Vasiliev, D. L. and Malich, M. G. (2021) Modeling The Process Of Disintegration Of Solid Materials By Asymmetric Loading In Crushing Machines In Order To Find Ways To Reduce Energy Costs. *Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions*. pp. 457- 473. doi: <https://doi.org/10.31713/m1028> .
4. Dedov, O.P. (2009). *Stvorennja rezonansnoï gidravlichnoï vibro-trambivki dlja ushhil'nennja gruntiv. Dis. kand.teh.nauk [Creation of hydraulic resonance vibration rammer for soil compaction. PhD Theses]. Kyiv.*
5. Mishchuk, Y., Nazarenko, I., Mishchuk, D., Ruchynskiy, M., Rogovskii, I., Mikhailova, L., Titova, L., Berezovyi, M., & Shatrov, R. Determination of energy characteristics of material destruction in the crushing chamber of the vibration crusher. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(7(112)), 41–49. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239292>.
6. Balaka M., Mishchuk D., Palamarchuk D. (2021) Suchasni ujavlennja pro mehanizm znosu protekturnykh gum [Modern ideas about the mechanism of tread rubber wear]. *Mining, constructional, road andmelioration machines*, 98, 30-36 doi: <https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.98.0302>.
7. Nazarenko, I.I. (2010). *Prikladni zadachi teorii vibracijnih system. Navchalnij posibnik (2-e vidannja) [Machines for the production of building materials. Textbook]. Kyiv: Vidavnychij Dim «Slovo».*
8. Nazarenko, I., Dedov, O., Bernyk, I., Rogovskii, I., Bondarenko, A., Zapryvoda, A. et. al. (2020). Determining the regions of stability in the motion regimes and parameters of vibratory machines for different technological purposes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (7 (108)), 71–79. DO: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.217747>.
9. Nesterenko, M., Nazarenko, I., Molchanov, P. (2018). Cassette Installation with Active Working Body in the Separating Partition. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3.2), 265. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14417>.
10. Bernyk, I., Luhovskyi, O., Nazarenko, I. (2018). Effect of rheological properties of materials on their treatment with ultrasonic cavitation. *Materiali in Tehnologije*, 52 (4), 465–468. doi: <https://doi.org/10.17222/mit.2017.021>.
11. Fladvad, M., Onnela, T. (2020). Influence of jaw crusher parameters on the quality of primary crushed aggregates. *Minerals Engineering*, 151, 106338. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106338>.
12. Ciężkowski, P., Maciejewski, J., Bąk, S. (2017). Analysis of Energy Consumption of Crushing Processes – Comparison of One-Stage and Two-Stage Processes. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 39 (2), 17–24. doi: <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0012>.

УДК 621.926.2

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0201>**Микола Ручинський,**

доктор філософії в галузі технічних наук,
професор кафедри Машин і Обладнання Технологічних Процесів,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9362-292X>
E-mail: ruchynskyi.mm@knuba.edu.ua

Борис Корнійчук,

доктор філософії в галузі технічних наук,
доцент кафедри Професійної Освіти,
Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури,
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3881-1581>
E-mail: korniichuk.bv@knuba.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОУДАРНОГО РЕЖИМУ ВИРОБНИЦТВА ФУНДАМЕНТНИХ БЛОКІВ

АНОТАЦІЯ. Запропонована конструкція віброустановки для формування фундаментних блоків в ударно-вібраційному режимі роботи із розпалубкою та зніманням готового виробу після завершення процесу його ущільнення. Розкриті закономірності руху віброударних установок з урахуванням впливу динамічних параметрів суміші із висотою виробу 0,6 м та отримані аналітичні залежності для забезпечення стабілізації динамічних параметрів вібромашини, яка працює в резонансному режимі з цілеспрямованим врахуванням внутрішніх коливальних властивостей вібросистеми. Визначена розрахункова та математична модель установки. Складені рівняння руху та досліджені зони стійкості. Розроблено алгоритм та методика розрахунку основних параметрів ударно-вібраційної установки. Сформульовано основні положення для створення віброударних машин для формування фундаментних блоків. Отримано числові значення динамічних параметрів робочого органу і середовища, які можна використовувати при проектуванні подібних віброударних систем.

Ключові слова: ударно-вібраційна установка, фундаментний блок, математична модель, рівняння руху, параметри, амплітуда, частота коливань, зона стійкості, методика.

RESEARCH AND DETERMINATION OF BASIC PARAMETERS OF VIBROSHOCK MODE OF PRODUCTION OF FUNDAMENTAL BLOCKS

ABSTRACT. The construction of vibrofluidizer shaping of fundamental blocks is offered in shock-oscillation office hours with formwork and removal of the finished product after completion of process of his compression. The regularities of the movement of vibro-impact units, taking into account the influence of the dynamic parameters of the mixture with a product height of 0.6 m, were revealed, and analytical dependencies were obtained to ensure the stabilization of the dynamic parameters of the vibrating machine, which works in the resonance mode with purposeful consideration of the internal oscillatory properties of the vibrating system. The calculation and mathematical model of setting is certain. Worked out equations of motion and the areas of stability are investigational. An algorithm and method of calculation of basic parameters of the shock-oscillation setting is developed. The main provisions for the creation of vibro-impact machines for the formation of foundation blocks have been formulated. Numerical values of the dynamic parameters of the working body and the environment were obtained, which can be used in the design of similar vibro-impact systems.

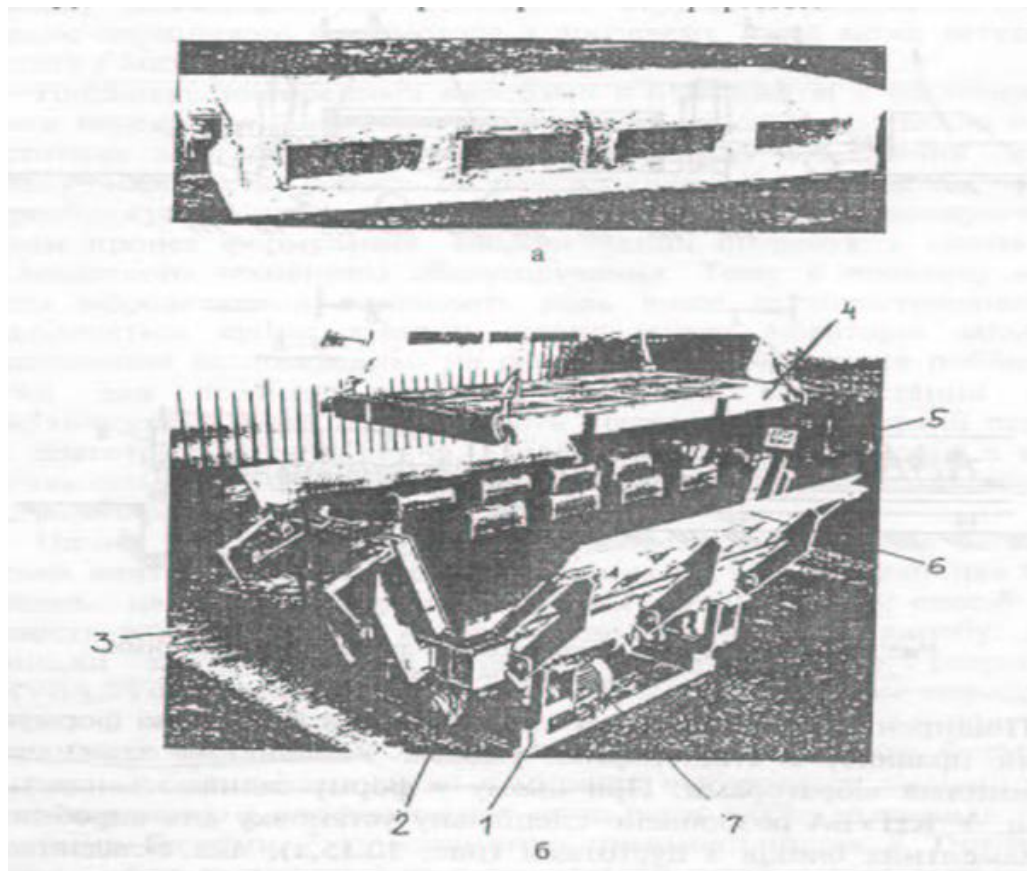
Keywords: shock-oscillation setting, fundamental block, mathematical model, equalization of motion, parameters, frequency of vibrations, area of stability, method.

1. Постановка проблеми. Поширеними в будівництві є фундаментні блоки, які формуються, як правило, в стаціонарних формах та гармонійним режимом ущільнення бетонної суміші. Така технологія характеризується низькою продуктивністю, недостатньою якістю готових виробів, наявністю каверн, значними витратами часу для отримання необхідної міцності готового виробу. Тому пошук нових конструктивних та технологічних параметрів та режимів ущільнення є задачею актуальною. В роботі висувається ідея застосування ударно-вібраційного режиму роботи із розробкою установки.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи формування просторових конструкцій, в тому числі і фундаментних блоків, здійснюються на вібраційних майданчиках [1] або в стаціонарних віброформах [2]. Теоретичною базою таких установок є застосування гармонійних коливань із резонансним режимом роботи [3]. Такі вібраційні установки характеризуються значними енергетичними витратами [4], складністю конструктивних елементів вібромашин. В роботі [5] запропоновано нову конструкцію, дослідженню якої і призначена дана робота.

3. Мета роботи. Визначення основних параметрів та режимів роботи ударно-вібраційної установки для формування фундаментних блоків.

4. Матеріали та методи. Спеціальна установка для виробництва фундаментних блоків з пустотами (рис. 1, а), яка складається із блочного ударно-вібраційного майданчика (рис. 1, б), що має два кінематично незв'язаних блоки 2. Блоки спираються на опорну раму 1. Привод вібраторів блоків здійснюється від двох електродвигунів через клинопасову передачу. Для забезпечення ударно-вібраційного режиму роботи на поверхні блоків закріплено прокладки, на яких встановлюється основа з закріпленими на ній поздовжніми 6 і поперечними 3 бортами й пустоотворювачами 5.



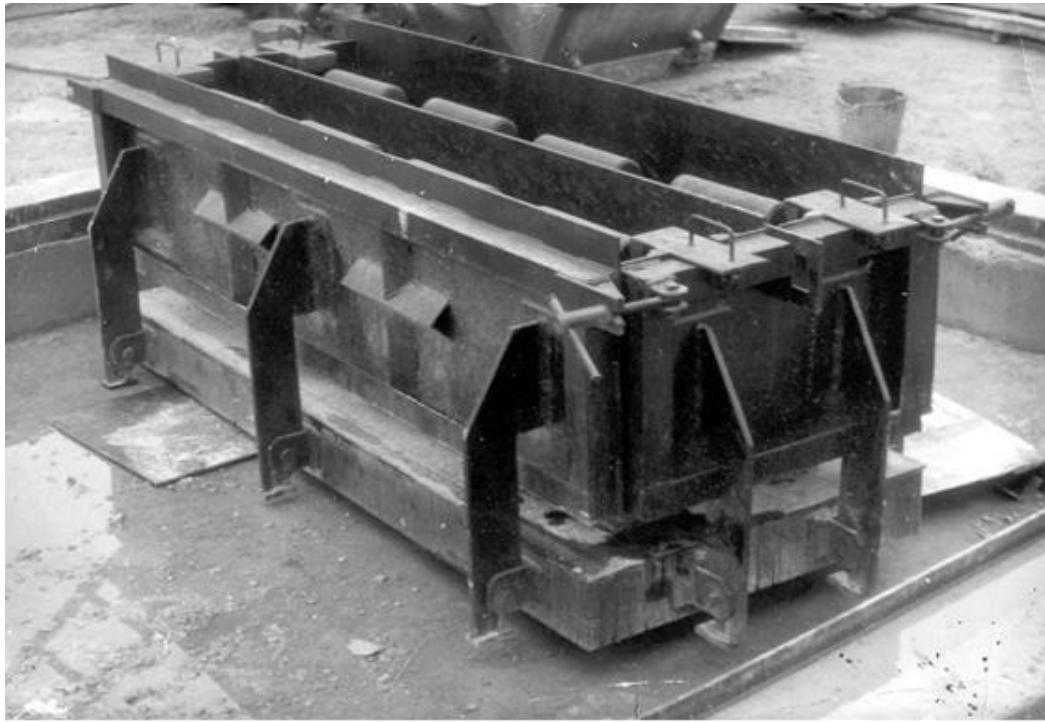


Рис.1. Фундаментний блок (а), конструкція блочного ударно-вібраційного майданчика (б) та його загальний вигляд у зібраному стані (в)
 Fig. 1. The foundation block (a), the structure of the block shock-vibration platform (b) and its general appearance in the assembled state (c)

На основі встановлюється піддон 4, який має отвори для проходження пустотоутворювачів. Борти скріплюються спеціальними замками. Для відокремлення блоків, що формуються, встановлюється перегородка. На поперечних бортах закріплені пазоутворювачі і наби з кришками для утворення порожнини для проходження гака крана та фіксації арматурних петель. Щоб запобігти сповзанню форми з вібромайданчика, передбачені пружні зв'язки між опорною рамою та формою.

Процес формування блоків полягає в такому. На основу з відкритими бортами встановлюється піддон. Потім закривають борти і фіксують їх замками. Перегородка краном вводиться до прорізу у поперечних бортах і ділить форму на два відсіки, забезпечуючи, таким чином, одночасне формування двох блоків. Форму змащують емульсією, до неї вкладають арматурні петлі і фіксують кришками. У форму укладається бетонна суміш, і вмикається привод вібромайданчика. Після закінчення операції ущільнення, яка триває 30...40 с, краном із форми витягується перегородка. Потім відкриваються замки, викидаються кришки і розкриваються борти (рис.1,в). Піддон із свіжовідформованими виробами краном переноситься до камери температурно-вологої обробки.

Розрахункову схему блочного ударно-вібраційного майданчика із урахуванням форми і бетонної суміші можна розглядати як двомасову систему (рис.2).

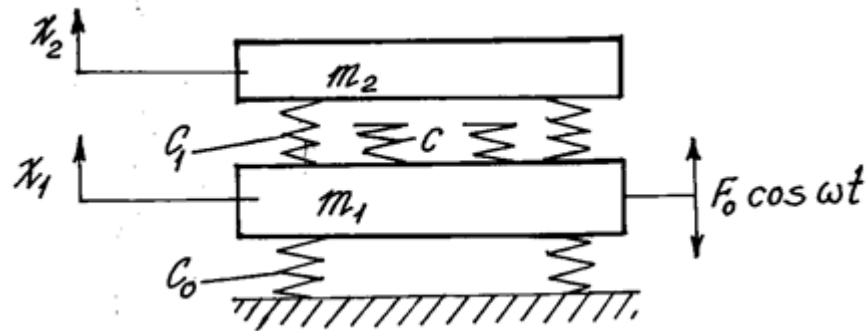


Рис. 2. Розрахункова схема блочного ударно-вібраційного майданчика
 Fig. 2. Calculation scheme of the block shock-vibration platform

5. Результати. Для обґрунтування математичної моделі приймаються наступні допущення:

- перша маса моделює інерційні властивості машини і є абсолютно жорстким тілом;
- жорсткості пружних опор вібромашини та пружного зв'язку між формою і робочим органом лінійні, тобто підкоряються закону Гука;
- вплив бетонної суміші на рух вібромашини враховується на основі розгляду її системою з розподіленими параметрами, які в рівняннях дискретно представлені через контактну силу взаємодії робочого органа і середовища;
- дисипативні властивості системи використовуються на етапах уточнення основних параметрів та визначення меж змін критеріїв, чітке значення яких забезпечує стійкий віброударний режим руху.

За таких передумов та припущень рівняння руху мають вид :

$$\text{при } \Delta > x: \begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (c_0 + c_1) x_1 - c_1 x_2 = F_0 \cos \omega t; \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_1 x_2 - c_1 x_1 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{при } \Delta < x: \begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + (c_0 + c_1 + c) x_1 - (c_1 + c) x_2 = F_0 \cos \omega t; \\ m_2 \ddot{x}_2 + (c_1 + c) x_2 - (c_1 + c) x_1 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

де Δ - зазор між ударником і верхньою масою. Отримані рівняння (1) і (2) можна дещо спростити, якщо врахувати умови роботи вібромашини ($c_0 \ll c$) і очевидний зв'язок, що $x = x_1 - x_2$. Приймаючи ці положення, отримаємо дещо змінену систему рівнянь:

$$\text{при } x < 0: \ddot{x} + c_1 \times \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) x = - \frac{F_0 \cos \omega t}{m_1}; \quad (3)$$

$$\text{при } x > 0: \ddot{x} + (c_1 + c) \times \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) x = - \frac{F_0 \cos \omega t}{m_1}. \quad (4)$$

Із наведених рівнянь (3) і (4) слідує, що переміщення x залежить від семи параметрів, тобто $x = f(F_0, m_1, m_2, c_1, c, \omega, t)$. Число змінних параметрів можна зменшити, якщо ввести нові безрозмірні параметри час τ та координату η :

$$\tau = \omega t; \quad \eta_1 = \frac{m_2 \times \omega^2 \times x_1}{F_0}; \quad \eta_2 = \frac{m_2 \times \omega^2 \times x_2}{F_0}; \quad (5)$$

$$\eta = \eta_1 - \eta_2; \quad \alpha = \frac{m_1}{m_2}.$$

При використанні (5) для перетворення рівнянь (3) і (4) будемо враховувати, що $(\ddot{x}_i)_t = \omega^2 \times (\ddot{x}_i)_\tau$. Тоді після виконання відповідних перетворень отримаємо нову систему рівнянь.

$$\ddot{\eta} + \xi_1^2 \times \eta = -q + \cos \tau; \quad \eta > 0; \quad (6)$$

$$\ddot{\eta} + \xi_2^2 \times \eta = -q + \cos \tau; \quad \eta \leq 0;$$

де

$$\xi_1^2 = \frac{c_1}{m_{\text{пр}} \times \omega^2}; \quad \xi_2^2 = \frac{c_1 + c}{m_{\text{пр}} \times \omega^2}; \quad q = \frac{m_2 \times g}{F_0} \times \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1} \right). \quad (7)$$

$m_{\text{пр}}$ - приведена маса вібромашини:

$$m_{\text{пр}} = \frac{m_1 \times m_2}{m_1 + m_2} \quad (8)$$

Коефіцієнт ξ (характеризує відношення власної частоти системи при середньому значенні параметра c_1 до частоти зміни параметра пружності) і коефіцієнт q (характеризує ступінь зміни параметра пружності) повністю визначають стійкість руху. Площина зміни параметрів ξ і q може бути розділена на області, що відповідають стійким і нестійким. Якщо параметри ξ і q попадають в зону стійкості, тоді можливі періодичні рішення (7). Визначимо раціональну область стійкості і час контакту для наступних вихідних даних: $m = 10^4 \text{ кг}; \omega = 157 \text{ 1/с}; c_1 = 7 \times 10^7 \text{ Н/М}$. Из (6) знайдемо, що коефіцієнт $\xi = 7 \times 10^7 / (10^4 \times 157^2) = 0,071$; час контакту $\tau_2 = \tau = 1 / (25 \times 16) = 2,5 \times 10^{-3} \text{ с}$. Щоб потрапити в першу зону стійкості руху, потрібно взяти $q < 1$, тобто при даних значеннях параметрів m, ω, c_1 будемо мати

$$-\frac{\pi c_2}{4 \cdot 10^4 n^2 \cdot 157^2 \sin(4n\pi)} < 1, \quad (9)$$

Звідки отримаємо, що $c_2 < 1,56 \times 10^8 \text{ Н/М}$. якщо ж $c > 1,56 \times 10^8 \text{ Н/М}$, то попадаємо в зону нестійкості, де і спостерігається параметричний резонанс на бажаній частоті коливань. Відмітимо, що наступна (друга) зона стійкості появляється при значенні $c_2 \approx 7,5 \times 1,56 \times 10^8 \text{ Н/М} = 1,17 \times 10^9 \text{ Н/М}$.

6. Висновки. Рішенням рівнянь (1–5) були виявлені зони стійкого режиму коливань.

Встановлено, що існують стійкі режими руху із різними значеннями періодів T . Виявлено, що для частот коливань у межах $100..160 \text{ с}^{-1}$ найбільш ефективним є співвідношення $\tau_k/T = 0,25...0,31$.

Встановлено, що при $\xi \geq 1,7$ є можливість отримати стійкий режим із значенням критерію $q = 2,5$ з мінімальними витратами енергії на коливання системи. Отримані результати використані для розробки алгоритму розрахунку віброустановки для формування фундаментних блоків.

Проведений аналіз поведінки реальних динамічних систем в полі статичного та динамічного навантаження, засвідчує необхідність врахування напружено-деформованого стану металоконструкцій та врахування його в математичних моделях.

Запропонована методологія та методи дослідження складних систем під дією статичного та динамічного навантаження.

Список використаних джерел:

1. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем (2-е видання) / І.І. Назаренко. Київ: Видавничий дім «Слово», 2010. – 440с.
2. Ivan Nazarenko Research of Working Process of a Vibration Machine with Controlled Parameters of Motion / Ivan Nazarenko, Oleg Dedov, Mykola Ruchynskiy, Anatoliy Sviderskiy // International Journal of Engineering & Technology Home Vol 7, No 4.8 (2018).– P: 376-379, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.8.27273.
3. I. Nazarenko Development of energy-efficient vibration machines for the buiding-and-contruction industry / I. Nazarenko, M.Ruchynskiy, A.Sviderskiy, I. Kobylanska, D. Harasim, A.Kalizhanova, A.Kozbakova // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY Vol 2019, No 4, p. 53-60, doi:10.15199/48.2019.04.10.
4. Назаренко І.І. Теоретичні дослідження робочого процесу ударно-вібраційної установки з визначенням законів руху та напружень в шарі бетонної суміші, що ущільнюється при кінематичному збудженні коливань / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, С.М. Жигилій, Т.М. Нестеренко // Науковий вісник будівництва : зб. наук. пр. - Х.: ХНУБА, 2016. - № 4 (86). - С. 172-176.
5. Ручинський М.М. Методи дослідження і розрахунку параметрів віброустановки для формування фундаментних блоків / М.М. Ручинський // Збірник «Гірничі, будівельні та меліоративні машини», Київ: КНУБА, 1999.- №54 - с.83-86.
6. Назаренко І.І., Ручинський М.М. Теоретичні дослідження динаміки машин для формування фундаментних блоків / Назаренко І.І. Ручинський М.М. // Прогрессивные технологии и машины для производства стройматериалов, изделий и конструкций. Тез. докладов Первой Всеукраинской научно-практической конференции. Полтава: ПДТУ, 1996. - с.146-147.
7. Назаренко І.І., Човнюк Ю.В., Ручинський М.М. Моделирование и расчет присоединенной массы формируемого изделия в управляемых виброударных системах строительного производства: влияние формы импульса/ Назаренко І.І., Човнюк Ю.В., Ручинський М.М. // Прогрессивные технологии и машины для производства стройматериалов, изделий и конструкций. Сб. научн. трудов НАН Украины "Физико-технические и технологические приложения математического моделирования, К., 1998, с. 183-186.
8. Назаренко І.І. Определение сил сопротивлений бетонной смеси при колебаниях виброплощадки. - В сб.: "Горные, дорожные, строительные машины", Київ, Техніка, 1973, №16 - с. 129-135.
9. Нестеренко Н.П. Разработка й внедрение унифицированного ряда низкочастотных виброплощадок с повышенной технологической зффективностью. Дис. канд. техн. наук. - Полтава, Полт. ИСИ, 1992, - 205 с.
10. Искович-Лотоцкий Р.Д., Матвеев Ё.Б., Крат В.А. Машины вибрационного и виброударного действия. - Киев, Техника, 1982. - 208 с.

References:

1. Nazarenko I. Applied problems of the theory of vibration systems (2nd edition) / I.I. Nazarenko. Kyiv: "Slovo" Publishing House, 2010. - 440 p.
2. Ivan Nazarenko Research of Working Process of a Vibration Machine with Controlled Parameters of Motion / Ivan Nazarenko, Oleg Dedov, Mykola Ruchynskiy, Anatoliy Sviderskiy // International Journal of Engineering & Technology Home Vol 7, No 4.8 (2018).– P: 376-379, DOI: 10.14419/ijet.v7i4.8.27273.
3. I. Nazarenko Development of energy-efficient vibration machines for the buiding-and-contruction industry / I. Nazarenko, M.Ruchynskiy, A.Sviderskiy, I. Kobylanska, D. Harasim, A.Kalizhanova, A.Kozbakova // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY Vol 2019, No 4, p. 53-60, doi:10.15199/48.2019.04.10.
4. Nazarenko I.I. Theoretical studies of the working process of an impact-vibration installation with determination of the laws off motion an the stresses in a layer of concrete mixture compacted under kinematic excitation of vibrations / I.I. Nazarenko, М.М. Nesterenko, S.M. Zhigilii, T.M. Nesterenko // Scientiific bulletin of construction: coll. Of science pr. – Kh.: Khnuba, 2016. – No.4 (86). – P. 172 – 176.

5. Ruchyskyy M. Methods of research and calculation of vibration installation parameters for the formation of foundation blocks / Collection «Mining, construction and reclamation machines», Kyiv, KNUBA, 1999.- №54 - p.83-86.
6. Nazarenko I., Ruchyskyy M. Theoretical studies of the dynamics of machines for forming foundation blocks / Nazarenko, I. Ruchyskyy M. // Progressive technologies and machines for the production of building materials, products and structures. Tez. reports of the First All-Ukrainian Scientific and Practical Conference. Poltava: PDTU, 1996. - p.146-147.
7. Nazarenko, I., Chovnyik Y., Ruchyskyy M. Modeling and calculation of the added mass of a molded product in controlled vibro-Impact systems of construction production: influence of the pulse shape / Nazarenko, I., Chovnyik Y., Ruchyskyy M. // Progressive technologies and machines for the production of building materials, products and structures.. Sat. scientific Proceedings of the National Academy of Sciences of Ukraine "Physico-technical and technological applications of mathematical modeling, K., 1998, p. 183-186.
8. Nazarenko, I. Determination of the resistance forces of the concrete mix during vibrations of the vibrating platform. - Collection «Mining, construction and reclamation machines», Kyiv, 1973, №16 - p. 129-135.
9. Nesterenko N.. Development and implementation of a unified range of low-frequency vibration platforms with increased technological efficiency. Dis. cand. tech. Sciences. - Poltava, Polt. ISI, 1992, - 205 p.
10. Iskovich-Lotockyy R., Matveev I., Krat V Machines of vibration and vibroimpact action. - Kyiv, Technique, 1982. - 208 p.

УДК 621.928.23

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0201>**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

Сергій Орищенко,

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/0000-0002-5359-5285>
E-mail: oryschenko.sv@knuba.edu.ua

ДИНАМІКА ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОТА ІЗ ВРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ СОРТУВАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ НА ЙОГО РОБОЧІ ПАРАМЕТРИ

АНОТАЦІЯ. *Визначена загальна розрахункова модель системи грохот – матеріал на основі дослідження процесів взаємодії сита та щебеню, що знаходився на грохоті. Вибрана модель вібраційного переміщення сипкого матеріалу дозволила визначити якісно-кількісні характеристики динамічного впливу на робочий орган. Представлено процес сортування як деякий упорядкований процес руху великої кількості різних часток в шарі на ситі. Сформульовані основні положення розрахунку основних параметрів грохота, які забезпечують задані режими процесу сортування матеріалу та отримання відповідного фракційного складу щебеню. Передумовою для вибору розрахункової схеми «грохот-просіювальний матеріал» є визначення вібраційного переміщення матеріальної частинки по віброуючій жорсткій поверхні, нахиленій до горизонту під кутом, що здійснює прямолінійні коливання під кутом до площини грохота. При цьому на частинку діють вага, сила тертя і нормальна реакція. Запропонована модель дала змогу визначити швидкість транспортування у випадку, коли сито грохоту здійснює циркуляційний рух, що являє собою додаток двох незалежних коливань із різними амплітудами й частотами. На процес сортування відчутно впливає ймовірність проходження зерен крізь отвори сита. Ця ймовірність залежить від розміру проходових часток, динамічних параметрів коливань грохоту, конструкції сита, форми отворів сита, коефіцієнта живого перетину (відношення площі отворів у світлі до загальної площі сита. Середня швидкість проходження часток крізь сито визначається частотою контактів часток з поверхнею й співвідношенням розмірів частки й отвору. На частоту контактів частки із ситом впливають амплітуда й частота коливань поверхні грохота. Оцінка ймовірності проходження частки крізь отвір сита за одного зіткнення може бути виконана на основі розрахункової схеми..*

Ключові слова: *вібраційний грохот, параметри, сортування, математична модель, амплітуда, частота коливань.*

DYNAMICS OF VIBRATION GRINDING WITH REGARD TO THE INFLUENCE OF SORTING MATERIAL ON ITS WORKING PARAMETERS

ABSTRACT. *The general calculation model of the screen system was determined - the material is based on the study of the interaction processes between the sieve and the crushed stone that was on the screen. The selected model of vibration movement of loose material made it possible to determine the qualitative and quantitative characteristics of the dynamic impact on the working body. The sorting process is presented as some orderly process of movement of a large number of different particles in a layer on a sieve. The main provisions for the calculation of the main parameters of the screen are formulated, which ensure the specified modes of the process of sorting the material and obtaining the appropriate fractional composition of crushed stone. The prerequisite for choosing the calculation scheme "screen-sieving material" is the determination of the vibrational movement of a material particle along a vibrating hard surface inclined to the*

horizon at an angle that carries out rectilinear oscillations at an angle to the plane of the screen. At the same time, weight, friction force and normal reaction act on the particle. The proposed model made it possible to determine the speed of transportation in the case when the screening screen performs a circular motion, which is the addition of two independent oscillations with different amplitudes and frequencies. The sorting process is significantly affected by the probability of grains passing through the holes of the sieve. This probability depends on the size of passing particles, the dynamic parameters of screen vibrations, the design of the sieve, the shape of the sieve openings, the coefficient of the live section (the ratio of the area of the openings in the light to the total area of the sieve). The average speed of passage of particles through the sieve is determined by the frequency of contact of particles with the surface and the ratio of particle sizes and the hole. The frequency of particle contact with the sieve is affected by the amplitude and frequency of vibrations of the sieve surface. The probability of a particle passing through the sieve hole during one collision can be estimated based on the calculation charts.

Keywords: vibrating screen, parameters, sorting, mathematical model, amplitude, frequency of oscillations.

1. Постановка проблеми. Підвищення ефективності процесів сортування матеріалів на вібраційних грохотах полягає в пошуку таких режимів та параметрів, які зменшують можливість затримання щебеню в отворах сит, прискорення процесу сортування, зменшення енерговитрат. Існуючі підходи, як правило, базуються на використанні емпіричних залежностей, що не дає можливість отримати загальноприйняту модель системи грохот – матеріал. Тому розробка такої моделі, застосування якої забезпечить підвищення ефективності робочого процесу сортування є задачею актуальною. Одним із шляхів забезпечення заданих технологією режимів і параметрів грохота є уточнене врахування матеріалу, що знаходиться на ситі та розробка на цій основі моделі системи грохот – матеріал, яка адекватно відображає реальний технологічний процес сортування.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. При математичному опису руху грохоту застосовуються різні підходи [1, 3], що і є результатом існуючої величезної кількості конструктивних рішень грохотів та їхніх параметрів [1-3]. Пояснюється це очевидним фактом виникаючої складності процесу врахування маси матеріалу в розрахунках параметрів грохота [3], наявністю такого явища, як "засміченість" отворів сит грохота [2], визначення істинної продуктивності [4]. Такий підхід змушував дослідників і конструкторів довгий час користуватися емпіричними залежностями для визначення параметрів грохотів [2], що виведені на основі оброблення результатів експериментальних досліджень. Достовірність таких залежностей є дійсними виключно в рамках застосованих в експериментах параметрах та конструктивних характеристиках робочого процесу сортування, використання того чи іншого матеріалу, з тим чи іншим гранулометричним складом. З розвитком теорії процесів сепарації у гірничодобувній та переробній промисловості [1], вдосконалення та створення нових конструкцій грохотів у будівельній галузі, намітилася тенденція у розробці нових розрахункових моделей. Ці моделі описують процес сортування на основі детермінованих та вірогідних уявлень, які в тій чи іншій мірі відображають реальну картину механіки руху грохота. Модель, що запропонована в роботі, відображає пружні, в'язкі й пластичні властивості сипкого тіла, а також опір зовнішнього середовища (рис. 1).

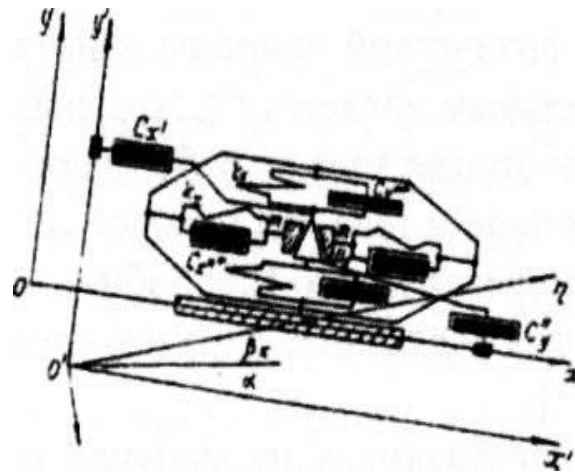


Рис.1. Модель системи «грохот – матеріал»
Fig. 1. Model of the "screen - material" system

Інерційні властивості сипкого тіла моделюються інерційними елементами масою m , його деформація й гістерезисні втрати, пов'язані з відносним рухом, моделюються елементами моделі Фойгта з коефіцієнтами пружності K_x, K_y й коефіцієнтами в'язкості C_x^{**}, C_y^{**} . Незворотні деформації шару у напрямку, перпендикулярному площині грохота, враховуються введенням елемента сухого тертя з коефіцієнтом тертя μ . Опір зовнішнього середовища приймається пропорційним абсолютній швидкості руху й моделюється демпферами з коефіцієнтами в'язкості C_x^* і C_y^* . Беручи до уваги відмінність опору, на етапах спільного руху й польоту, на етапі польоту вводяться демпфери з коефіцієнтами пружності $C_x'', C_y'', C_x''', C_y'''$. Пружно-в'язка – пластична модель є достатньо універсальною. Гнучкість моделі зумовлена можливістю введення в її структуру додатково елементів, що відображають ті або інші властивості описуваного процесу. Однак реалізація її в практиці розрахунків пов'язана з необхідністю експериментального визначення великої кількості реологічних параметрів, зумовленої відповідною кількістю складових пружних, в'язких, пластичних й інерційних елементів структури, що практично не дає можливості вирішити задачу в аналітичному вигляді. Поряд з дискретними моделями застосовуються моделі, у яких зазначається прагнення врахувати відносний рух шарів у сипкому тілі за безвідривних режимів вібропереміщення. Отримана модель, у якій рух окремої частки узагальнюється, як рух сипкого тіла, що представляє собою нескінченну кількість розділених горизонтальними поверхнями елементарних шарів, однакової маси, віднесеної до одиниці площі поверхні сита. Тобто в кінцевому результаті приходимо до континуальної моделі, яка і є найбільш наближеною до реальних умов опису процесів сортування матеріалу. Разом з тим, дискретне представлення у вигляді рівнянь, які зв'язують сили опору зсуву окремих елементарних шарів і швидкості руху цих шарів відкриває можливість оцінити фізику процесу сортування, що необхідно для вибору конкретних параметрів та визначення впливу маси просіювального матеріалу на рух грохота.

3. Мета роботи. Визначення ступені врахування впливу оброблювального середовища на головні параметри грохота.

4. Матеріали та методи. Представимо процес сортування як деякий упорядкований процес руху великої кількості різних часток в шарі на ситі.

Кожну частку із розміром d характеризує її крупність, яка не змінюється в процесі руху, і є величиною, що може мати дискретну безліч значень: d_1, d_2, \dots, d_n . Оскільки кількість часток у шарі велика, то d можна надавати довільні значення в інтервалі заданого шару фракцій, і таким чином, вважати її величиною безперервною (рис. 2.).

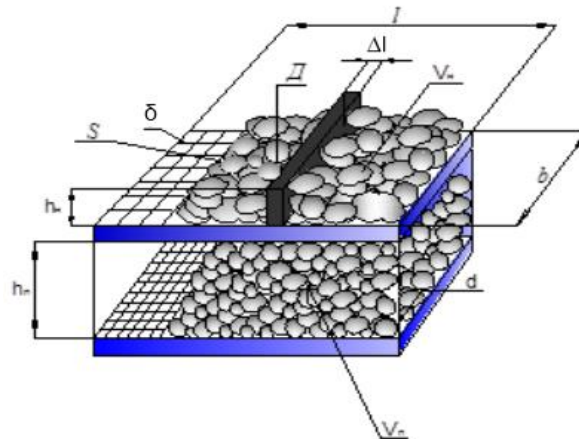


Рис.2. Схема розташування матеріалу на грохоті:

l, b - довжина і ширина сита; h_n, h_p - висота надрешітного і підрешітного продукту; S - площа сита; Δl - ділянка сита; D, d - середній діаметр надрешітних і підрешітних продуктів; δ - товщина проволоч сита; V_n, V_p - об'єм надрешітного і підрешітного продукту

Fig. 2. Scheme of the location of the material on the screen:

l, b - length and width of the sieve; h_n, h_p - height of the superlattice and sublattice product; S - sieve area; Δl - section of the sieve; D, d - the average diameter of the superlattice and sublattice products; δ - thickness of sieve wires; V_n, V_p - the volume of the superlattice and sublattice product

Виходячи із цього припущення систему часток можна замінити її безперечною моделлю, а продуктивність Π буде визначатися за формулою:

$$\Pi = V/t = bhv = bhl/t = sh/t, \quad (1)$$

де V – об'єм шару матеріалу на ситі, m^3 ; t - час транспортування матеріалу по ситі, s ; b - ширина сита, m ; l - довжина сита, m ; S - площа сита, m^2 ; h – середня висота шару на ситі, m ; v - швидкість транспортування, m/s .

Об'єм можна представити як суму об'ємів надрешітного і підрешітного матеріалів:

$$V = V_n + V_p = S_n h_n + S_p h_p, \quad (2)$$

Якщо розділити сито по довжині на рівні ділянки Δl (рис. 2) то

$$\Delta l = l/n = \text{const}, \quad (3)$$

де n - довільне число. Тоді об'єм V_n , розподілиться рівними порціями V_k по Δl :

$$V_k = \Delta l_k h_n b_n = \text{const}, \quad (4)$$

де k - номер відрізка Δl .

Розподілений таким чином по довжині l об'єм V_n утворює шар з вимірами паралелепіпеду, усереднюючи неоднорідність складових його зерен. Для продукту об'ємом V_n це означає, що всі чарунки сита, через які він отримується, для випадку щільного суміщення утворюється прямокутник, площа якого дорівнює S_n . Використовуючи вірогідність проходження частинок і передбачаючи, що за кожного кидка шару V_b на сито по його ширині висівається "важких" зерен $n = b_{шв} / d_{гр}$ і по довжині сита $n = l / d_{гр}$, отримаємо об'єм граничних зерен, які сортуються за один кидок шару на ситі:

$$V_b = (\pi d_{гр} b_b \times l) / 6. \quad (5)$$

Тоді продуктивність по сортуванні важких зерен становитиме:

$$\Pi_b = V_b / T = 0,08 d_{гр} b_b l \omega. \quad (6)$$

Відповідно загальна оптимальна продуктивність за живленням:

$$\Pi=100\Pi_B/C_B. \quad (7)$$

Тепер розглянемо рух одиничної частинки по поверхні сита, яке здійснює коливання за найбільш загальними законами (рис. 3) з метою визначення раціональних параметрів грохота.

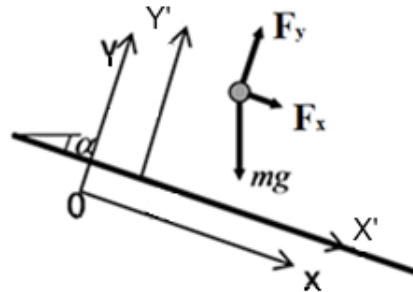


Рис.3. Розрахункова схема процесу руху частинки по сити
Fig. 3. Calculation scheme of the process of movement of a particle through a sieve

Диференціальні рівняння відносного руху частинки над поверхнею сита в пов'язаній з нею рухомою системою координат:

$$\dot{V}_{y'} = -g\cos\alpha + X_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + f_y), \quad (8)$$

$$\dot{y}' = V_{y'}, \quad (9)$$

$$\dot{V}_{x'} = g\sin\alpha + X_x \omega_x^2 \cos(\omega_x t + f_x), \quad (10)$$

$$\dot{x}' = V_{x'}, \quad (11)$$

де $V_{x'}$ і $V_{y'}$ – проекції швидкості відносного руху частинки, а останні доданки в (8) і (9) відповідають силам інерції переносного руху

$$F_x = m\omega_x^2 X_x \sin(\omega_x t + f_x), \quad (12)$$

$$F_y = m\omega_y^2 X_y \sin(\omega_y t + f_y). \quad (13)$$

Рівняння (8) і (9) не враховують сили опору повітря руху частки. Частинка, що лежить на поверхні сита, переходить у стан вільного польоту, зумовленого рівняннями (8) – (11), за умови, що

$$X_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + f_y) > g\cos\alpha. \quad (14)$$

За досягнення у вільному польоті поверхні сита ($y'=0$) частинка здійснює удар по поверхні сита. Зміна її швидкості від удару може бути описана співвідношеннями непружного удару

$$V_{y'}^+ = -R V_{y'}^-, \quad (15)$$

$$V_{x'}^+ = v_{x'}^- - f(R+1)V_{y'}^-, \quad (16)$$

де R – коефіцієнт відновлення швидкості від удару, f – коефіцієнт тертя частинки з поверхнею сита, індекси « \rightarrow » і « \leftarrow » відповідають станам безпосередньо до й після удару. З одного боку, за експериментального визначення цих коефіцієнтів наявною є суттєва невизначеність, а з другого – в реальних умовах частинка вдаряється не об поверхню сита, а об шар частинок

на ній, після чого її відносна швидкість практично дорівнює нулю. Тому з прийнятною для практичних розрахунків точністю можна вважати $V_y^+ = V_x^+ = 0$ при кожному ударі. Коефіцієнт тертя f будемо визначати як коефіцієнт внутрішнього тертя або кут природного ухилу сипкого матеріалу. Після попадання частинки на поверхню сита з шарами частинок на ньому можливими декілька варіантів її подальшої поведінки: якщо $X_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + f_y) > g \cos \alpha$, то частинка відривається від поверхні й продовжує рух над поверхнею відповідно до рівнянь (8) – (11); якщо в момент приєднання частинки до поверхні й протягом деякого наступного проміжку часу $X_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + f_y) < g \cos \alpha$, то частинка залишається на поверхні доти, доки не поміняється знак нерівності. Її рух уздовж поверхні сита протягом цього проміжку часу визначається такими умовами:

якщо

$$|(g \cos \alpha - X_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + f_y))| f > |g \sin \alpha + X_x \omega_x^2 \sin(\omega_x t + f_x)|, \quad (17)$$

то

$$V_x = 0, \quad (18)$$

і частинка є нерухомою на поверхні сита,

якщо

$$|(g \cos \alpha - X_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + f_y))| f < |g \sin \alpha + X_x \omega_x^2 \sin(\omega_x t + f_x)| \quad (19)$$

то

$$\dot{V}_x = g \sin \alpha + X_x \omega_x^2 \sin(\omega_x t + f_x) - f(g \cos \alpha - X_y \omega_y^2 \sin(\omega_y t + f_y)), \quad (20)$$

$$\dot{x} = V_x. \quad (21)$$

Отже, частинка рухається уздовж поверхні під дією проекції сили ваги, змінної сили тертя, зумовленої змінним притисненням частки до поверхні, і змінної поздовжньої сили інерції переносного руху. Чисельні експерименти з описаною вище моделлю дають змогу визначити характеристики руху частки над горизонтальною поверхнею, що здійснює вертикальні коливання, необхідні для розгляду періодичного сортування. Із цих характеристик важливими є амплітуда X_0 і частота ω коливань та частота контактів часток з поверхнею, які і визначають умови проходження часток крізь отвори сита. Розрахунки свідчать, що незалежно від початкової фази досить швидко формується цикл руху частки, з якого легко визначити амплітуду її підкидань над поверхнею й період контактів з нею. На рис.4 відображено вплив кругової частоти ω й амплітуди x коливань поверхні на амплітуду руху частки. За амплітуди 5мм відрив частки від поверхні сита починається за кругової частоти 45рад/с, а за амплітуди 2,5мм – взагалі за частоти 63рад/с.

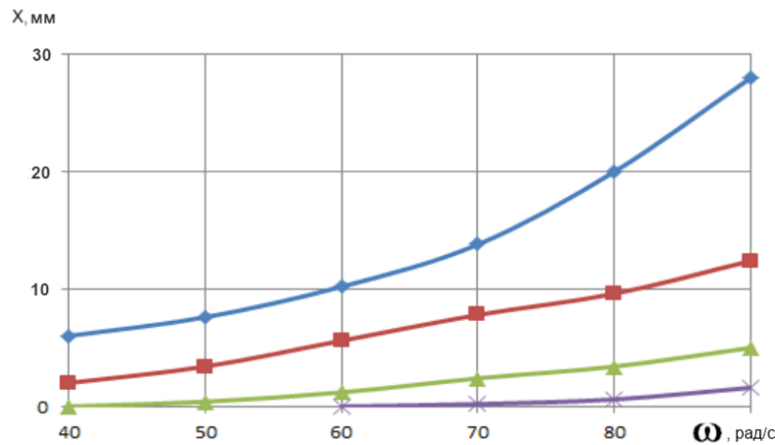


Рис.4. Зміна амплітуди частинок матеріалу в залежності від частоти коливань поверхні: ¶

—◆— $X=10$ мм —■— $X=8$ мм
—▲— $X=6$ мм —×— $X=4$ мм ¶

Fig. 4. Change in the amplitude of material particles depending on the frequency of surface vibrations

На рис.5 показано вплив кругової частоти й амплітуди поверхні на частоту контактів частки з поверхнею. Тут для кожної амплітуди є своя частота обертання, відповідна максимальній частоті контактів, тобто найбільш швидкому проходженню часток крізь отвори. Проте за частоти 50 рад/с вплив амплітуди поверхні на частоту контактів виявляється не набагато більшим.

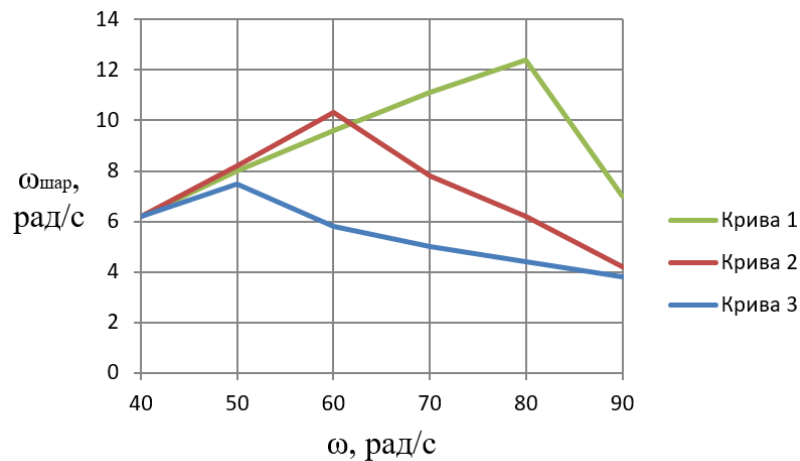


Рис.5. Вплив частоти коливань грохота на частоту контактів часток з його поверхнею за різних амплітуд (1- $X=10$ мм, 2-8мм, 3-6мм)

Fig. 5. The effect of the vibration frequency of the screen on the frequency of contact of particles with its surface at different amplitudes (1- $X=10$ mm, 2-8mm, 3-6mm)

Результати оцінки існуючих математичних описів руху грохоту засвідчують застосування різних підходів, внаслідок виникаючої складності врахування маси матеріалу в розрахунках параметрів грохота. Такий підхід змушував користуватися емпіричними залежностями для визначення параметрів грохотів, що стримувало пошук методів підвищення ефективності грохотів. Виконаними дослідженнями визначена розрахункова модель (рис. 2), яка представляє процес сортування, як деякий упорядкований процес руху великої кількості різних часток в шарі на ситі. Математична модель, що відображає рух часток по поверхні сита

дала можливість виявити вплив частоти коливань та кута нахилу на ефективність грохочення. Так, зі збільшенням частоти коливання й амплітуди коливань короба збільшується відрив матеріалу і швидкість переміщення та проходження матеріалу крізь отвори сита. Встановлено, що швидкості часток має більше значення за частоти коливань короба, яка має числові значення в межах $\omega = 45 \dots 85$ рад/с. За зміни кута нахилу сита від 14° до 20° концентрація, і швидкість сортування мають більш сталий характер. На процес сортування відчутно впливає ймовірність проходження зерен крізь отвори сита. З'ясовано, що ймовірність залежить від розміру проходових часток, динамічних параметрів коливань грохоту, конструкції сита, форми отворів сита, коефіцієнта живого перетину (відношення площі отворів у світлі до загальної площі сита). Середня швидкість проходження часток крізь сито визначається частотою контактів часток з поверхнею й співвідношенням розмірів частки й отвору. На частоту контактів частки із ситом впливають амплітуда й частота коливань поверхні грохота. Ця частина досліджень в числових значеннях згаданих вище параметрів потребує додаткових досліджень, що є обмеженням результатів даної статті. Оцінка ймовірності проходження частки крізь отвір сита передбачена в подальших дослідженнях авторів.

6. Висновки. Існуючі математичні моделі опису руху грохоту побудовані в основному на визначенні амплітуди та частоти коливань застосуванням емпіричних залежностей, що стримує розвиток нових конструктивних та технологічних рішень підвищення ефективності процесів сортування.

Виявлено вплив частоти коливань та кута нахилу на ефективність грохочення. Так, зі збільшенням частоти коливання й амплітуди коливань короба, збільшується відрив матеріалу і швидкість переміщення та проходження матеріалу крізь отвори сита.

Потребує додаткових досліджень ймовірність проходження зерен крізь отвори сита, яка суттєво впливає на процес сортування і залежить від розміру проходових часток, динамічних параметрів коливань грохоту, конструкції сита, форми отворів сита, коефіцієнта живого перетину.

Список використаних джерел:

1. Василенко М.В. Теорія коливань і стійкість руху: підручник / М.В. Василенко, О.М.Алексейчук. – К.:Вища школа, 2004. – 525с.
2. Ланець О.С. Високоефективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом / О.С. Ланець. – Львів: Львівська політехніка, 2008. – 324с.
3. Надутый В.П. Вибрационное грохочение горной массы повышенной влажности / В.П.Надутый, В.В.Калиниченко, Днепропетровск НГУ Украины. 2004. – 135с.
4. Назаренко І.І. Машини для виробництва будівельних матеріалів. – К.: "ВПОЛ", 1999. – 488 с.
5. Назаренко І.І., Туманська О.В. Машини і устаткування підприємств будівельних матеріалів. – К.: Вища школа, 2004. – 590 с.
6. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем. Навчальний посібник (2-е видання) / І.І. Назаренко. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2010. – 440 с.
7. Ivan Nazarenko; Artur Onyshchenko; Serhii Oryshchenko; Oleg Fedorenko; SergiiTsepelev; Liudmyla Titova. Research of technical systems of materials sorting processes 2021, Kyiv –P.43-56.
8. Назаренко І.І., Орищенко С.В., Клименко М.О., Навчальний посібник “Синтез машин і обладнання будівельної індустрії”, 2023р-с.84.
9. Назаренко І.І., Берник І.М. Основи проектування і конструювання машин та обладнання переробних виробництв. Навчальний посібник для вищих навчальних закладів. – К.: Видавничий Дім «Слово», 2012. – 590 с.
10. Назаренко І.І., Берник І.М., Кузьмінець М.П., Онищенко А.М., Технічні основи створення машин: Підручник. За загальною редакцією І.І. Назаренка. К.: Видавництво Людмила, 2018. 308 с.

References:

1. Vasylenko M.V. Theory of oscillations and stability of motion: a textbook / M.V. Vasylenko, O.M.

- Alekseichuk. - K.: Higher school, 2004. - 525p.
2. *Lanets O.S.* Highly efficient interresonance vibration machines with an electromagnetic drive / O.S. Lanets – Lviv: Lviv Polytechnic, 2008. – 324p.
 3. *V.P. Nadutyi*, Vibration of rock mass of increased humidity / V.P. Nadutyi, V.V. Kalinichenko, Dnepropetrovsk National University of Ukraine. 2004. – 135 p.
 4. *Nazarenko I.I.* Machines for the production of building materials. - K.: "VIPOL", 1999. - 488 p.
 5. *I.I. Nazarenko, O.V. Tumanska.* Machines and equipment of construction materials enterprises. - K.: Vyshcha shkola, 2004. - 590 p.
 6. *Nazarenko I.I.* Applied problems of the theory of vibration systems. Study guide (2nd edition) / I.I. Nazarenko. - K.: "Slovo" Publishing House, 2010. - 440 p.
 7. *Ivan Nazarenko; Artur Onyshchenko; Serhii Oryshchenko; Oleg Fedorenko; Sergii Tsepelev; Liudmyla Titova.* Research of technical systems of materials sorting processes 2021, Kyiv – P.43-56.
 8. *Nazarenko I.I., Oryshchenko S.V., Klymenko M.O.,* Study guide "Synthesis of machines and equipment of the construction industry", 2023-p.84.
 9. *I.I. Nazarenko, I.M. Bernyk.* Basics of design and construction of machines and equipment of processing industries. Study guide for higher educational institutions. - K.: "Slovo" Publishing House, 2012. - 590 p.
 10. *I.I. Nazarenko, I.M. Bernyk, M.P. Kuzminets, A.M. Onyshchenko,* Technical basics of creating machines: Textbook. Under the general editorship of I.I. Nazarenko K.: Lyudmila Publishing House, 2018. 308 p.

УДК 621.4

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0201>**Ігор Косминський**

кандидат 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/0000-0003-0234-7166>
E-mail: kosminskyi.iv@knuba.edu.ua

Ілля Санкін,

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

Катерина Левчук

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

ВИБІР СТИРЛІНГ ТЕХНОЛОГІЇ, ЯК ШЛЯХ ДО ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ТРАДИЦІЙНИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

ABSTRACT. Проаналізовано можливості використання двигунів Стирлінга в якості енергоперетворюючої техніки. В глобальному огляді технологій перетворення енергії він визнаний двигуном з потенціалом для подальшого розвитку. Високий ККД, простота та надійність конструкції двигуна Стирлінга зумовлюють ефективність його використання у різних енергетичних установках, зокрема в когенераційних. Найбільш перспективним напрямком розвитку децентралізованого теплопостачання з точки зору максимального наближення джерела тепла до споживача є використання теплових насосів. Використання теплових насосів дозволяє скоротити споживання паливних ресурсів на 10% на рік та утилізувати відпрацьоване тепло з навколишнього середовища.

Ключові слова: енергозбереження, двигун Стирлінга, когенераційні установки, теплові насоси, електрогенератори.

CHOOSING STIRLING TECHNOLOGY AS A WAY TO ENERGY SAVING AND REDUCING THE USE OF TRADITIONAL ENERGY RESOURCES

ABSTRACT. The possibility of using Stirling engines as energy converting equipment is analyzed. In a global review of energy conversion technologies, it is recognized as an engine with potential for further development. The high efficiency, simplicity and reliability of the Stirling engine design determine the effectiveness of its use in various power plants, in particular in cogeneration ones. The most promising development direction of decentralized heat supply from the point of view of bringing the heat source as close as possible to the consumer is the use of heat pumps. The use of heat pumps allows you to reduce the consumption of fuel resources by 10% per year and dispose of waste heat from the environment.

Key words: energy saving, Stirling engine, cogeneration plants, heat pumps, electric generators.

У всіх розвинених країнах світу (перш за все, ЄС і США) основою інноваційного розвитку промисловості стає завдання переходу на новий технологічний рівень, пов'язаний з енергозбереження, екології та скороченням частки використання традиційних енергоресурсів. Так, до 2025 року в країнах ЄС більше 20% енергії вироблятиметься за рахунок використання альтернативних і поновлюваних видів палива. [1].

Як відзначають автори [2,13] у світових оглядах по енергоперетворюючій техніці, двигун Стирлінга розглядається як двигун, що володіє можливостями для подальшої розробки. Двигун Стирлінга відноситься до класу двигунів із зовнішнім підведенням

теплоти (ДЗПТ). У зв'язку з цим, в порівнянні з ДВЗ, в двигунах Стірлінга процес горіння здійснюється поза робочих циліндрів і протікає більш рівноважно, робочий цикл реалізується в замкнутому внутрішньому контурі при малих швидкостях підвищення тиску в циліндрах двигуна, плавному характеру теплогідрравлічних процесів робочого тіла внутрішнього контуру, при відсутності газорозподільчих механізмів клапанів».

Сучасні традиційні системи автономного енергопостачання на основі термомеханічних установок були адаптовані до рівня суспільного і технологічного розвитку. Однак, зростання нагальних національних і глобальних проблем, таких як виснаження природних ресурсів, енергетична криза, забруднення навколишнього середовища, руйнування озонового шару і посилення парникового ефекту, зумовили необхідність прийняття у другій половині 20-го століття низки важливих міжнародних і українських законів з питань екології, природокористування та енергозбереження.[3,4]. Основним змістом цих законів було скорочення викидів CO₂, припинення виробництва озоноруйнівних речовин і фреону R-12, холодоагенту, що використовується в парокомпресійних холодильних машинах (ПКХМ), ресурсо- та енергозбереження, а також перехід автомобільного транспорту на екологічно чисте паливо.

До переваг машин Стірлінга можна віднести наступні ключові особливості, які є унікальними для машин Стірлінга і є передумовою їх широкого застосування практично у всіх галузях промисловості і техніки

- Сам термодинамічний цикл надзвичайно універсальний і може бути перероблений для створення перетворювачів як прямого, так і зворотного циклу;
- Найвища енергоефективність (теоретичний ККД ідеального циклу машини Стірлінга дорівнює ККД циклу Карно);
- Високий ступінь екологічної чистоти як самої машини, так і вихлопних газів від її роботи;
- Використання місцевої сировини та нетрадиційних джерел тепла, таких як сонячне тепло, природний газ, торф, вугілля тощо.

У глобальному огляді технологій перетворення енергії двигун Стірлінга був визнаний двигуном з потенціалом для подальшого розвитку. Низький рівень шуму, низький рівень викидів, здатність працювати на різних видах палива, тривалий термін служби, порівняні розміри і вага, хороші характеристики крутного моменту - це ті параметри, які дозволять двигунам Стірлінга замінити двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) в найближчому майбутньому.

Двигуни Стірлінга належать до класу двигунів із зовнішнім підведенням теплоти (ДВТ). Тому, порівняно з двигунами внутрішнього згорання, двигуни Стірлінга працюють більш рівномірно, а процес згорання відбувається поза робочим циліндром. Робочий цикл здійснюється в замкнутому внутрішньому контурі з відносно низькою швидкістю підвищення тиску в циліндрі двигуна, плавними теплогідрравлічними процесами в робочих елементах внутрішнього контуру і відсутністю шлепакового механізму газорозподілу.

Широке використання автономних джерел енергії, що працюють на місцевому паливі, відображає світову тенденцію до енерго- та ресурсозбереження. Цей напрямок інтенсивно розвивається у країнах, що мають значний запас біоресурсів (ліси, торф'яних боліт тощо): Швеції, Норвегії, Данії, Фінляндії, прибалтійські країни. Найбільших результатів досягла Швеція. Природний газ як енергетичне паливо в шведській енергетиці займає трохи більше 2%, тоді як біоресурси дають більше 21% від загального обсягу одержуваної енергії.[5] Загалом у країнах Європейського Союзу близько 14% загальної енергії отримано із біоресурсів [6]. В Індії програма децентралізації виробництва енергії, ініційована у 1995 році, дозволить вже найближчим часом забезпечити отримання енергії з біоресурсів у кількості 44% від запланованого споживання електроенергії[7].

В даний час низкою провідних компаній (Philips, STM Inc., Daimler Benz, Solo, United Stirling) розпочато виробництво двигунів, технічні характеристики яких вже зараз перевершують ДВС і газотурбінні установки (ГТУ). Ці двигуни мають ефективний ККД (до 45%), питому масу від 3,8 до 1,2 кг/кВт, ресурс до 40 тис. годин та потужність від 3 до 1200 кВт[8].

Високий ККД, простота та надійність конструкції двигуна Стірлінга зумовлюють ефективність його використання у сонячних енергетичних установках. Сонячне світло фокусується увігнутими дзеркалами для розігріву двигуна (як джерело тепла). У ролі охолоджувача може використовуватися навколишнє атмосферне повітря. Роль такого екологічно чистого джерела енергії у світі легко оцінити. З відомих практично реалізованих сонячних установок для отримання електроенергії найбільшим ККД мають установки з параболічним дзеркалами і двигунами Стірлінга [9]. Концентратор з двома ступенями свободи відображає сфокусовані промені, переміщаючись з урахуванням річних та добових змін положення Сонця. Промені прямують на теплообмінник, в якому нагрівається робоче тіло двигуна Стірлінга, що приводить генератор електричного струму.

В умовах зростання цін на основні енергоносії практика показала, що набагато вигідніше отримувати електроенергію і тепло від невеликих локальних теплових електростанцій (когенераційних установок). Когенерація - це нова технологія комбінованого виробництва електричної та теплової енергії на основі незалежних двигунів і систем рекуперації тепла, які використовують енергію охолоджувальної води та вихлопних газів для потреб опалення споживачів.

Когенераційні установки з двигунами Стірлінга потужністю від десятків до тисяч кВт матимуть незаперечну перевагу над відомими автономними електростанціями з двигунами внутрішнього згоряння. Порівняно з двигунами внутрішнього згоряння, ефективність двигунів Стірлінга в когенераційних установках обумовлена особливістю їх теплового балансу, що виражається як різниця між тепловими втратами з вихлопними газами і з охолоджувальною водою. У випадку двигунів Стірлінга цей баланс становить 10% і 40% відповідно і, враховуючи високий ККД двигуна, дозволяє створити компактну і високоефективну когенераційну установку. В інших країнах розпочато виробництво когенераційних установок з двигунами Стірлінга, що працюють на деревній трісці, торфі, біогазі та сільськогосподарських відходах (рисовій лушпинні, кавовій лушпинні) потужністю 5-40 кВт і тепловою потужністю 12-120 кВт [10].

Ця нова технологія відкриває великі можливості для забезпечення електроенергією і теплом сіл, ферм та інших об'єктів. Це допоможе вирішити багато проблем, пов'язаних з міським житлово-комунальним господарством. Магістральні трубопроводи централізованого тепlopостачання дуже довгі, а це означає, що значна частина теплової енергії втрачається під час транспортування гарячої води від ТЕЦ до споживача. Якщо в мікрорайоні встановити районні теплоелектроцентралі на базі когенераційних установок з двигуном Стірлінга, вони можуть цілий рік забезпечувати недорогими електроенергією, теплом і гарячою водою житлові будинки, школи і дитячі садки.

Найбільш перспективним напрямком розвитку децентралізованого тепlopостачання з точки зору максимального наближення джерела тепла до споживача є використання теплових насосів. Використання теплових насосів дозволяє скоротити споживання паливних ресурсів на 10% на рік та утилізувати відпрацьоване тепло з навколишнього середовища. Теплові насоси на основі циклу Стірлінга можуть забезпечити 3-7 кВт тепла з 1 кВт електроенергії. Теплові насоси Стірлінга можуть використовуватися для забезпечення теплом нових і реконструйованих будівель і споруд і особливо ефективні для установки в розосереджених будівлях, таких як ферми, митниці, піонерські поселення, котеджі і приватні житлові будинки.

Основна відмінність теплових насосів Стірлінга від інших теплових насосів, таких як парокompресійні та абсорбційні теплові насоси, полягає в тому, що робоче тіло теплового насоса Стірлінга не змінює фазового стану протягом усього циклу, так що навіть зовнішнє повітря з температурою нижче -30°C може використовуватися як відпрацьоване низькопотенційне тепло, а тепло з температурою вище 100°C - як теплоносій для системи опалення. Ще однією перевагою теплових насосів Стірлінга є їхня висока термодинамічна ефективність і використання екологічно чистих приводів.

Найбільш перспективним є серійне виробництво електрогенераторів невеликої потужності з модифікацією двигуна Стірлінга під місцеве біопаливо: торф, відходи сільського

господарства і лісопереробній промисловості. Нова технологія відкриває широкі можливості для постачання електроенергією і теплом сільських районів, селищ, фермерських господарств, тваринницьких ферм, птахофабрик і тощо. Вона також допоможе вирішити багато проблем житлово-комунальних господарств міст.

Серійне виробництво двигунів Стірлінга дозволить забезпечити завантаження високотехнологічних підприємств вітчизняного машинобудування та експорт наукомістких технологій в області автономної енергетики.

Список використаних джерел:

1. Економічна Правда. (2022). Як війна в Україні пришвидшує перехід ЄС на відновлювані джерела енергії. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/05/12/686934/>.
2. О.П. Шматенко, Ю.І. Семірненко, І.І. Семірненко, А.М. Соломенний (2017) Використання малих когенераційних установок з двигунами Стірлінга для виробітку енергії в модульних системах військово-медичних підрозділі. Наук.-практ. журн. «Військова Медицина України», № 2, Том 17, с. 85-90. URL: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6696/1/1.pdf>.
3. Постанова Верховної Ради України. (2000) Про рекомендації парламентських слухань щодо дотримання вимог екологічного законодавства в Україні, напрямів реалізації та вдосконалення екологічної політики. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2130-14#Text>.
4. Закон України. (2019). Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>.
5. Біоенергетична асоціація України. (2022). Досвід ефективного заміщення викопних палив відновлюваними у європейських країнах. URL: <https://uabio.org/materials/12780/>.
6. Каталоги | Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського (2011). URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&image_file_name=PDF/ecee_2011_11_7.pdf.
7. Зварич І.Я. (2015). Енергетичне Майбутнє Індії. DSpace at West Ukrainian National University, с. 15. URL: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/12059/1/ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАЙБУТНЄ ІНДІЇ.pdf>.
8. Двигун Стірлінга. Журнал "Аква-Терм" №3 (67), 2012 URL: <https://td-bm.com.ua/blogs/dvigun/uk/vnesnij-dvigun-stirlinga/>.
9. Внутренний сайт АУЭС - aues.kz. (2020). Проект микро ТЭЦ на основе твердотопливного котла и двигателя Стирлинга. URL: https://info.aues.kz/diploms/2016/tef/pte/anorbaev_ka_AUES.pdf.
10. ТОВ "ВІССМАНН". (2023). Використання когенерації для децентралізованого виробництва електроенергії. URL: <https://www.viessmann.ua/uk/zhytlovi-budynky/jaka-opaliuvalna-systema/koheneracia.html>.
11. Stirling Engine Assessment, EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1007317. –URL: <http://www.engr.colostate.edu/~marchese/mech337-10/epri.pdf>.
12. Паращук В. Р. (2019). Енергоефективність застосування двигунів Стирлінга з концентратором сонячного випромінювання : дипломна робота магістра за спеціальністю „141 — електроенергетика, електротехніка та електромеханіка“. — Тернопіль: ТНТУ, 2019. — 104 с.
13. Пирогов В.В., Якушева Н.О. (2017). Перспективи Розвитку І Області Застосування Двигунів Стірлінга. Міжнародна науково-практична конференція. м. Ужгород, 21-22 квітня 2017 р., с. 38-41. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/conf/tech/14april2017/122.pdf>.
14. Леонов Д. М., Буслова Н. В. (2020). Розвиток Альтернативної Енергетики В Україні: Перспективи Та Проблеми. International scientific e-journal: ΛΟΓΟΣ. ONLINE. № 16. DOI: <https://doi.org/10.36074/2663-4139.16.14>.

REFERENCES:

1. Economic Truth. (2022). Jak vijna v Ukraini prishvidshue perehid ES na vidnovljувani dzhерela energii (How the war in Ukraine is speeding up the EU's transition to renewable energy sources). URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/05/12/686934/>.
2. Shmatenko O.P., Semirnenko Yu.I., Semirnenko I.I., Straw A.M. (2017). Viktoristannja malih kogeneracijnih ustanovok z dvigunami Stirlinga dlja virobitku energii v modul'nih sistemah vijs'kovomedichnih pidrozdili (The use of small cogeneration units with Stirling engines for power generation in

- modular systems of the military-medical unit.). Scientific and practical journal "Military Medicine of Ukraine", No. 2, Vol. 17, p. 85-90. URL: <https://repo.snau.edu.ua/bitstream/123456789/6696/1/1.pdf>.
3. Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine. (2000) Pro rekomendacii parlaments'kih sluhan' shhodo dotrimannja vimog ekologichnogo zakonodavstva v Ukraïni, naprjamiv realizacii ta vdoskonalennja ekologichnoï politiki (On the recommendations of the parliamentary hearings regarding compliance with the requirements of environmental legislation in Ukraine, directions for implementation and improvement of environmental policy). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2130-14#Text>.
 4. Law of Ukraine. (2019). Pro Osnovni zasady (strategiju) derzhavnoï ekologichnoï politiki Ukraïni na period do 2030 roku (About the Basic principles (strategy) of the state environmental policy of Ukraine for the period up to 2030). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>.
 5. Bioenergy Association of Ukraine. (2022). Dosvid efektyvnogo zamishhennja vikopnih paliv vidnovljuvanymi u evropejs'kih kraïnah (Experience of effective replacement of fossil fuels with renewable ones in European countries). URL: <https://uabio.org/materials/12780/>.
 6. Katalogi | Nacional'na biblioteka Ukraïni imeni V. I. Vernads'kogo (Catalogs | National Library of Ukraine named after V. I. Vernadskyi). (2011). URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/ecee_2011_11_7.pdf.
 7. Zvorych I.Ya. (2015). Energetichne Majbutne Indii (India's Energy Future). DSpace at West Ukrainian National University, p. 15. URL: <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/12059/1/ЕНЕРГЕТИЧНЕ МАЙБУТНЄ ІНДІЇ.pdf>.
 8. Dvigun Stirlinga (Stirling engine). Aqua-Term" magazine. No. 3 (67), 2012 URL: <https://td-bm.com.ua/blogs/dvigun/uk/vnesnij-dvigun-stirlinga/>.
 9. Internal site of AUES - aues.kz. (2020). Proekt mikro TJeC na osnovе tverdotoplivnogo kotla i dvigatelja Stirlinga (Micro CHP project based on solid fuel boiler and Stirling engine). URL: https://info.aues.kz/diploms/2016/tef/pte/anorbaev_ka_AUES.pdf.
 10. "WISSMANN" LLC. (2023). Viktoristannja kogeneracii dlja decentralizovanogo virobnictva elektroenergi (Use of cogeneration for decentralized electricity production). URL: <https://www.viessmann.ua/uk/zhytlovi-budynky/jaka-opaliuvalna-systema/koheneracia.html>.
 11. Stirling Engine Assessment, EPRI, Palo Alto, CA: 2002. 1007317. –URL: <http://www.engr.colostate.edu/~marchese/mech337-10/epri.pdf>.
 12. Paraschuk V.R. (2019). Energoefektivnist' zastosuvannja dviguniv Stirlinga z koncentratorom sonjachnogo viprominjuvannja (Energy efficiency of using Stirling engines with a solar radiation concentrator) : master's thesis by specialty „141 — eelectrical engineering, electrical engineering and electromechanics“. — Ternopil: TNTU, 2019. — p.104.
 13. Pirogov V.V., Yakusheva N.O. (2017). Perspektivi Rozvitku I Oblasti Zastosuvannja Dviguniv Stirlinga (Prospects for the Development and Applications of Stirling Engines). International scientific and practical conference. Uzhhorod city, 21-22 April, p. 38-41. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/conf/tech/14april2017/122.pdf>.
 14. Leonov D. M., Buslova N. V. (2020). Rozvitok Al'ternativnoï Energetiki V Ukraïni: Perspektivi Ta Problemi (Development of Alternative Energy in Ukraine: Prospects and Problems). International scientific e-journal: ΛΟΓΟΣ. ONLINE. No. 16. DOI: <https://doi.org/10.36074/2663-4139.16.14>.

Технологія захисту навколишнього середовища

УДК 628.336.5

DOI: <http://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0201>**Сергій Шаманський,**

доктор технічних наук,
професор кафедри водопостачання та водовідведення
Київський національний університет будівництва і архітектури
просп. Повітрофлотський 31, м. Київ, 03037, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6215-3438>
E-mail: shamanskiy.sy@knuba.edu.ua

Леся Павлюх,

кандидат технічних наук,
доцент кафедри екології,
Національний авіаційний університет
просп. Любомира Гузара 1, м. Київ, 03058, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7715-4601>
E-mail: lenyo@ukr.net

Віктор Репета,

доцент кафедри вищої математики
Національний авіаційний університет
просп. Любомира Гузара 1, м. Київ, 03058, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5615-7889>
E-mail: victor.repeta@npp.nau.edu.ua

МЕТОДОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОРГАНІЗАЦІО-ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ З ВІДБУДОВИ ІНФРАСТРУКТУРИ ВОДОВІДВЕДЕННЯ НА ЗАСАДАХ ЕКОБЕЗПЕЧНОСТІ

Анотація. Розглянуто екологічні проблеми, що виникають у зв'язку з виведенням з ладу об'єктів інфраструктури водовідведення. Отже, **метою дослідження** є розроблення методологічних основ прийняття рішень при підготовленні організаційно-технічних заходів відновлення інфраструктури водовідведення в умовах післявоєнної відбудови країни на підставах екобезпеки. Як **методи** під час проведення досліджень використовувався комплексний підхід до управління екологічною безпекою, використовувалися методи системного аналізу, синтезу та критеріального аналізу. **В результаті** проведення досліджень проаналізовано наслідки, спричинені зношенням та руйнуванням об'єктів інфраструктури водовідведення, проаналізовано останні дослідження, присвячені методикам підготовки організаційно-технічних заходів її реконструкції та відновлення. Здійснено обґрунтування та розроблено структуру теоретико-методологічного підходу до формування організаційно-технічних заходів для управління екологічною безпекою функціонування інфраструктури водовідведення. Проведено систематизацію основних факторів впливу на результати управління екологічною безпекою. Розроблено структурну модель взаємодії між цими факторами. На підставі сформульованих критеріїв розроблено систему показників, що визначають ефективність організаційно-технічних заходів управління екологічною безпекою інфраструктури водовідведення. Також у статті розроблено методичні підходи до прийняття організаційно-технічних рішень з управління екологічною безпекою, показано шляхи підвищення ефективності роботи інфраструктури водовідведення, а також розроблено блок-схему можливого інструментального забезпечення організаційно-технічних рішень для підтримання екологічної безпеки. **Таким чином встановлено**, що управління екологічною безпекою на сучасному етапі вимагає розроблення нових методик та організаційно-технічних рішень, які повинні прийматися суб'єктами управління у певній послідовності. **Перевагами цього є те**, що вибір алгоритму прийняття рішень за запропонованим підходом та його дотримання, а також використання запропонованого інструментарію, дозволяє забезпечувати ефективну роботу відновленої інфраструктури на засадах екобезпеки.

Ключові слова: екологічна безпека, інфраструктура водовідведення, відбудова, організаційно-технічні заходи, методологічне забезпечення.

METHODOLOGICAL PROVISION OF ORGANIZATIONAL AND TECHNICAL MEASURES FOR THE CONSTRUCTION OF THE WATER SUPPLY INFRASTRUCTURE ON THE BASIS OF ECO-SECURITY

Abstract. The article considers the environmental problems arising from the failure of wastewater infrastructure facilities. Therefore, **the purpose** of the research is to develop the methodological bases for decision-making during the preparation of organizational and technical procedures for the restoration of the drainage infrastructure in the conditions of the post-war reconstruction of the country on the basis of environmental safety. The **methods** used during the research: an integrated approach to environmental safety management, methods of system analysis, synthesis, and criterion analysis method. **As a result** of the research, the consequences caused by the wear and destruction of the drainage infrastructure were analyzed, and the latest studies, devoted to the methods of preparation of organizational and technical procedures for its reconstruction and restoration were analyzed. The substantiation was carried out and the structure of the theoretical and methodological approach to the formation of organizational and technical measures for managing the environmental safety of the functioning of the drainage infrastructure was developed. Systematization of the main factors influencing the results of environmental safety management was carried out. A structural model of the interaction between these factors had been developed. On the basis of the established criteria, a system of indicators had been developed that shows the effectiveness of organizational and technical procedures for managing the environmental safety of the drainage infrastructure. There were developed methodological approaches to making organizational and technical decisions on environmental safety management, ways to increase the efficiency of water drainage infrastructure were shown, and also a flowchart of possible instrumental support of organizational and technical decisions to support environmental safety was developed. **As a result**, it was established that the management of environmental safety at the current stage requires the development of new methods and organizational and technical solutions, which must be adopted by management subjects in a certain composition. **The benefits of this** are that the choice of the decision-making algorithm according to the proposed approach and adherence to it, as well as the use of the proposed toolkit, make it possible to ensure the efficient operation of the restored infrastructure on the basis of environmental safety.

Keywords: environmental safety, water drainage infrastructure, reconstruction, organizational and technical procedures, methodological support.

1. Постановка проблеми. Агресія Росії стала причиною багатьох кризових вищ в Україні. Одними з найнебезпечніших кризових наслідків при цьому є екологічні наслідки. Руйнація комунальної інфраструктури, спричинена наслідками бойових дій, позбавляє мешканців доступу до базових послуг життєзабезпечення. Серед них питне водопостачання та водовідведення.

Населені пункти України допочатку бойових дій мали розвинену систему забезпечення питною водою [1]. Разом з тим системи водовідведення охоплювали значно менший відсоток населення централізованим каналізуванням.

Існуючі мережі водовідведення та каналізаційні очисні споруди часто були морально і фізично застарілими, зношеними і потребували реконструкції. Проте їх функціонування дозволяло підтримувати рівень екологічної безпеки регіонів на рівні, достатньому для безпечного проживання населення.

Руйнація існуючої інфраструктури водопостачання не дозволяє забезпечувати достатнього доступу населення до питної води нормативної якості. Це викликає загрози здоров'ю та життю мешканців. Такі проблеми тимчасово вирішуються спробами забезпечити населення привізною водою необхідної якості. Ще більші проблеми виникають при руйнації інфраструктури водовідведення [2].

Виведення з ладу каналізаційних очисних споруд призводить до забруднення водою патогенними та іншим організмами, що загострює проблему організації питного водопостачання у регіоні. Руйнація каналізаційних насосних станцій, самопливних і напірних каналізаційних мереж у населених пунктах призводить до розповсюдження таких забруднень у ґрунтах та ґрунтових водах безпосередньо на територіях цих населених пунктів. Це призводить до ризиків розповсюдження епідеміологічних захворювань.

Відповідно до статті 9 Закону України «Про критичну інфраструктуру» від 16

листопада 2021 року № 1882-ІХ (Із змінами, внесеними згідно із Законом № 2684-ІХ від 18.10.2022), «до життєво важливих функцій та/або послуг, порушення яких призводить до негативних наслідків для національної безпеки України, належать, зокрема: ...водопостачання та водовідведення» [3].

Зниження рівня екологічної безпеки потребує як невідкладних заходів, так довгострокових стратегій відбудови зруйнованої та реконструкції застарілої інфраструктури водопостачання та водовідведення. Для розроблення такої стратегії необхідним є розроблення методологічного забезпечення прийняття організаційно-технічних рішень під час відбудови країни [4].

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій. Низька якість води в поверхневих водоймах, а також руйнації, спричинені воєнними діями, потребує від підприємств водопостачання нових концептуальних підходів щодо забезпечення споживачів якісною питною водою та застосування нових технологічних схем і споруд водопідготовки [5]. Воєнне та техногенне навантаження на водні ресурси призводить до погіршення якості майже в усіх поверхневих водах країни і пов'язаних з ними підземних джерелах, а тому простежується тенденція не відповідності нормам як за хімічними, так і за мікробіологічними показниками. На водопровідних станціях в Україні застосовується класична схема реагентного очищення води з відстоюванням та фільтруванням. Промивні води відстійників та фільтрів скидаються у поверхневі джерела водопостачання без додаткового очищення, що є абсолютно не допустим. Будівництво очисних споруд для промивних вод на водопровідних станціях дозволить мінімізувати, або ліквідувати повністю процес скидання стоків у водойми через очищення, впровадження технології повторного використання промивних вод (замкнений цикл), а також системи утилізації осаду. Реконструкція водопровідних та каналізаційних мереж є першочерговими заходами в інвестиційних програмах усіх територіальних громад України.

За даними досліджень [6] потребують ремонту, на прикладі окремого селища, насосні станції та локальні водопроводи, які працюють за схемою: водозабір-водоводи-розподільча мережа.

Відтак, модернізація водопровідної мережі та основного насосного обладнання дозволить комунальному підприємству знизити витрати на забір води та її транспортування, підвищити якість питної води і надійність водопостачання.

Потребують значних капітовкладень очисні споруди КП «Компанія «Вода Донбасу», котре має стратегічне значення як єдиний постачальник води в Донецькій області: забезпечує послугами водопостачання та водовідведення 289 населених пунктів (близько 3,9 млн населення). У підприємства недостатньо коштів на закупівлю реагентів та впровадження робіт з ремонтів та реконструкцій основних фондів.

Водозабезпечення Одеського району здійснюється від водозабору ВОС «Дністер» філії «Інфоксводоканал» ТОВ «Інфокс». Забруднення питної води централізованих систем водопостачання зумовлене незадовільним санітарно-технічним станом споруд та водопровідних мереж, порушенням режимів у зонах санітарної охорони джерел водопостачання, відсутністю необхідного комплексу очисних споруд. Найбільш забрудненими з джерел нецентралізованого водопостачання за санітарно-хімічними показниками були проби з індивідуальних шахтних колодязів (80,3%), за мікробіологічними показниками – з громадських шахтних колодязів (38,7%). Це пов'язано, з одного боку, зі специфікою рівнів мінералізації ґрунту та підземних вод в області, з іншого боку – порушенням санітарних вимог під час планування забудівлі приватних господарств (відстані від колодязів до дворових туалетів, тваринницьких будівель, городів, особливо під час використання мінеральних добрив). Основними забруднювачами поверхневих вод вважаються підприємства житлово-комунального господарства. З чотирьох наявних поверхневих водозаборів, де відбувається очищення води до питної якості, на одному в м. Кілія, водоочисні споруди потребують повної реконструкції (потребує ремонту хлораторна). Якість питної води також значною мірою залежить від стану водопровідноканалізаційного

господарства. Значна частина водопровідно-каналізаційних споруд області: насосних станцій, очисних споруд та водопровідноканалізаційних мереж відпрацювала нормативний строк експлуатації, що призводить до підвищених витрат електроенергії, збільшення вартості перекачування води і стоків та погіршення якості питної води [7].

Попри війну позитивним аспектом у сфері водоочищення є реконструкція очисних споруд села Липляни. КП «Луцькводоканал» – на сьогодні єдине в Україні водопостачальне підприємство, яке продовжує втілювати важливий міжнародний проєкт «Комплексна модернізація системи водопостачання і водовідведення у м. Луцьку» [8].

Отже, проаналізувавши неефективність роботи водоочисного обладнання через морально-застарілий стан та, через воєнні дії, які значно погіршили становище, варто розробити методологічне забезпечення організаційно-технічних заходів з відбудови комунальної інфраструктури, керуючись принципами екологічної безпеки.

Проблемі фізично та морально зруйнованої інфраструктури водовідведення, а також необхідності її реконструкції та модернізації уже досить тривалий час приділяється багато уваги. Розвиток водопровідно-каналізаційного господарства декларувався як пріоритетний напрямок державного розвитку, оскільки орієнтований на вирішення соціальних, економічних та екологічних проблем [9]. Серед головних зачач, що потребують першочергового вирішення ставились: модернізація каналізаційних очисних споруд з залученням більш прогресивних технологічних процесів; реконструкція каналізаційних насосних станцій з впровадженням енергозберігаючого насосного обладнання; покращення системи обліку стічних вод під час їх транспортування та очищення; реконструкція каналізаційних мереж з залученням трубопроводів з більш стійких та довговічних матеріалів тощо [10].

Стратегією національної безпеки України наголошено на посиленні загроз для критичної інфраструктури, пов'язаних з погіршенням її технічного стану. Визначено пріоритети забезпечення безпеки критичної інфраструктури, а саме: удосконалення правових основ захисту; посилення охорони об'єктів; розвиток співробітництва між суб'єктами; впровадження механізмів, що дозволяють обмінюватися інформацією щодо загроз критичній інфраструктурі; розроблення механізмів щодо запобігання виникненню техногенних аварій на об'єктах критичної інфраструктури; впровадження організаційно-технічних рішень щодо мінімізації наслідків техногенних аварій [11].

Ще в умовах гібридної війни існували значні загрози критичній інфраструктурі, що проявлялось у частому пошкодженні об'єктів, здійсненні кібератак тощо. Це свідчило про вразливість критичної інфраструктури до сучасних загроз [12].

Навмисне руйнування інфраструктури водовідведення під час збройної агресії суттєво загострило існуючі проблеми водовідведення та створило багато нових [13]. Серед них можна виділити:

- знищення чи руйнування об'єкта інфраструктури;
 - відсутність електропостачання протягом тривалого часу і, як результат, вихід з ладу об'єкта інфраструктури;
 - руйнування трубопроводних мереж;
 - відсутність паливно-мастильних матеріалів, а також обладнання і матеріалів, необхідних для нормальної експлуатації чи ремонту об'єкта інфраструктури;
 - неможливість фінансування необхідних для функціонування об'єкта інфраструктури закупівель обладнання та матеріалів, а також фінансування виконання робіт;
 - відсутність можливості реагування на виникнення аварійних ситуацій;
 - втрата кадрового потенціалу і відсутність можливостей залучення підрядних організацій.
- Масштаби екологічних наслідків можна буде оцінити лише після закінчення воєнних дій. Кількість зруйнованих об'єктів інфраструктури водопостачання та водовідведення за перший рік повномасштабної війни складає [14]:

- водопровідні очисні споруди – 9 шт (з існуючих 400 шт);
- каналізаційні очисні споруди – 17 шт (з існуючих 967 шт);

- водопровідні насосні станції – 82 шт (з існуючих 5646 шт);
- каналізаційні насосні станції – 52 шт (з існуючих 2908 шт);
- водопровідні мережі – 1,046 тис. км (з існуючих 98,076 тис. км);
- каналізаційні мережі – 0,327 тис. км (з існуючих 37,053 тис. км);
- артезіанських свердловин – 33 шт (з існуючих 22134 шт);
- резервуарів чистої води – 20 шт (з існуючих 21129 шт);
- водонапірних башт – 24 шт (з існуючих 6947 шт).

Сумарний грошовий збиток від цих руйнувань склав близько 1 млрд умовних одиниць.

3. Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення методологічних основ прийняття рішень при підготовленні організаційно-технічних заходів відновлення інфраструктури водовідведення в умовах післявоєнної відбудови країни на підставах екобезпеки. Для цього передбачається вирішити такі задачі:

- проаналізувати результати останніх досліджень щодо екологічних наслідків, спричинених зношенням та руйнуванням об'єктів інфраструктури водовідведення, а також дослідження присвячені методикам підготовки організаційно-технічних заходів її реконструкції та відновлення;
 - обґрунтувати теоретико-методологічний підхід до формування організаційно-технічних заходів для управління екологічною безпекою;
 - дослідити фактори впливу на результати управління екологічною безпекою функціонування інфраструктури водовідведення;
 - розробити ієрархічну систему показників ефективності організаційно-технічних заходів для управління екологічною безпекою інфраструктури водовідведення;
 - запропонувати методичні підходи до прийняття організаційно-технічних рішень для управління екологічною безпекою;
- запропонувати інструментальне забезпечення організаційно-технічних рішень для підтримання екологічної безпеки при функціонуванні інфраструктури водовідведення.

4. Матеріали та методи. Ефективність роботи інфраструктури водовідведення можна охарактеризувати такими основними показниками [15]:

- виконання поставлених задач (дотримання вимог, що висуваються нормативним законодавством);
- відношення одержаного результату до затраченого ресурсу;
- стабільність результату протягом тривалого періоду часу.

Теоретико-методологічний підхід до ефективності інфраструктури водовідведення передбачає визначення сукупності соціально-економічних, екологічних та інших процесів і явищ, що пов'язані з досягненням основних показників при умові раціонального користування ресурсами та ефективною утилізацією відходів [16]. Можна запропонувати структуру теоретико-методологічного підходу до формування організаційно-технічних заходів з управління екологічною безпекою функціонування інфраструктури водовідведення, що наведено на рис. 6.1.

Результати ефективної роботи інфраструктури можна поділити на:

- економічний результат;
- соціальний результат;
- екологічний результат;
- комерційний результат;
- інші результати.

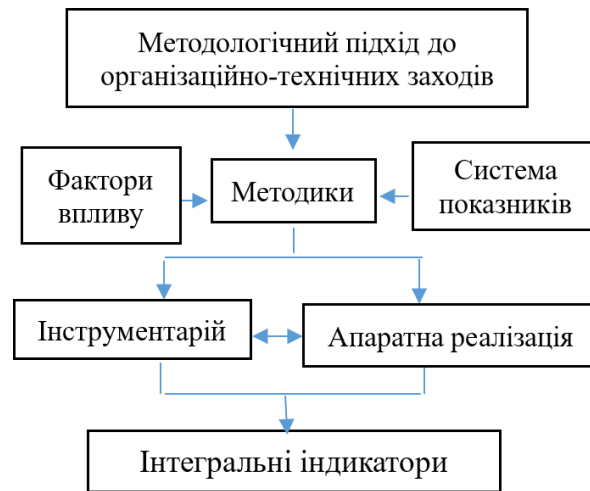


Рис. 1.1. Структура теоретико-методологічного підходу до формування організаційно-технічних заходів з управління екологічно безпекою функціонування інфраструктури водовідведення

Fig. 1.1. The structure of the theoretical and methodological approach to the formation of organizational and technical procedures to manage the environmental safety of the functioning of the drainage infrastructure

Результатами функціонування інфраструктури водовідведення можна також вважати кількісні та якісні характеристики підсумків роботи у середовищі, що включає господарський та географічний сегменти. При цьому передбачається використання наявних внутрішніх та зовнішніх ресурсів та повне досягнення поставлених задач за умови забезпечення необхідного рівня екологічної безпеки [17].

Досягнення поставлених задач ґрунтується на залученні ресурсів, як внутрішніх, так і зовнішніх. В результаті діяльності відбувається трансформація цих ресурсів. Модель управління екологічною безпекою та самі управлінські рішення, що при цьому приймаються, повинні ґрунтуватися на внутрішніх можливостях та ресурсному потенціалі та враховувати внутрішні та зовнішні фактори впливу на цільові результати діяльності [18].

Модель факторів впливу на результати управління екобезпекою, що можна запропонувати для інфраструктури водовідведення, наведена на рис. 6.2.

Системою показників можна назвати побудовану на системних засадах сукупність пов'язаних між собою показників, що розглядаються комплексно і утворюють єдине ціле. Система показників повинна забезпечувати формування поставлених цілей і показувати шляхи їх досягнення. Призначенням цієї системи є не просто бути основою для фіксації кількісних значень параметрів екологічної безпеки функціонування інфраструктури, а бути джерелом інформації про перебіг внутрішніх процесів на об'єктах інфраструктури (поточні показники), а також можливих зовнішніх наслідків при реалізації тих, чи інших організаційно-технічних заходів (стратегічні показники). Необхідність розроблення ефективної системи показників диктується необхідністю швидкої адаптації функціонування інфраструктури до змін у середовищі її функціонування, а також необхідністю контролю за досягненням поставлених стратегічних цілей.

Систему показників можна будувати за принципом ієрархічності, або за принципом комплексності [19]. У першому випадку ієрархія вказує на залежність показників більш високого рівня від показників більш низького рівня. У другому випадку показники мають складні зв'язки між собою і важко піддаються ієрархізації.

При формуванні показників доцільно користуватися:

- принципом використання найкращої доступної практики, а саме використання попереднього досвіду та сучасних досягнень в управлінні екологічною безпекою інфраструктури водовідведення;

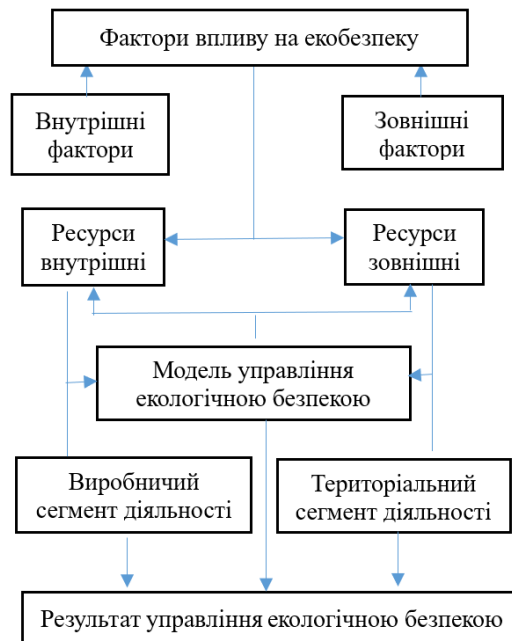


Рис. 1.2. Модель факторів впливу на результати управління екологічною безпекою
Fig. 1.2. Model of influencing factors on the results of ecological safety management

- принципом необхідного і достатнього обсягу, що передбачає з одного боку достатність інформації для забезпечення досягнення поставлених цілей, з іншого боку відсутність її надлишковості;

- принципом доступності, а саме представленням показників у легкій для сприйняття формі.

Можна запропонувати структуру ієрархічної системи показників ефективності організаційно-технічних заходів для управління екологічною безпекою, що наведена на рис. 6.3.



Рис. 1.3. Структурна схема системи показників ефективності організаційно технічних заходів для управління екологічною безпекою

Fig. 1.3. Structural diagram of the system of performance indicators of organizational and technical procedures for environmental safety management

Управління екологічною безпекою на сучасному етапі вимагає розроблення нових методик та організаційно технічних рішень, які повинні прийматися суб'єктами управління у певній послідовності [20]. Враховуючи способи реалізації процедур управління можна запропонувати методичні підходи до прийняття організаційно технічних рішень для управління екологічною безпекою, що наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 1.1. Методичні підходи до прийняття організаційно технічних рішень для управління екологічною безпекою

Table 1.1. Methodical approaches to making organizational and technical decisions for environmental safety management

№ З/п	Назва методики	Сутність методики
1	Методика лінійного управління	Послідовність планових управлінських рішень з подальшими коригуваннями залежно від отриманого результату, або відхилень від очікуваного результату
2	Методика результат-орієнтованого управління	Оцінювання результатів кожного управлінського рішення з коригуванням наступних рішень залежно від відхилень від очікувань
3	Методика ситуаційного управління	Прийняття управлінських рішень у відповідності з поточною ситуацією та необхідністю реагування на поточні проблеми
4	Методика цільового управління	Прогнозування необхідного рівня екологічної безпеки функціонування та розроблення покрокового шляху її досягнення
5	Методика регламентно-го управління	Визначення необхідного рівня екологічної безпеки функціонування з урахування наявних ресурсів та можливостей та розроблення шляхів досягнення
6	Методика програмно-цільового управління	Визначення необхідного рівня екологічної безпеки функціонування, розробляються етапи досягнення визначеного рівня, строки завершення етапів та цільові показники кожного етапу
7	Методика антисипатив-ного управління	Забезпечення підтримання рівня екологічної безпеки функціонування з врахуванням невизначеності умов навколишнього середовища

На рис. 6.4. наведено блок-схему можливого інструментального забезпечення організаційно-технічних рішень для підтримання екологічної безпеки при функціонуванні інфраструктури водовідведення.

Застосування перелічених методичних підходів повинно забезпечуватися відповідним інструментарієм, що відповідає сучасним вимогам до управлінських процесів. Інструментарієм можна назвати групи засобів, що можуть допомогти у вирішенні поставлених задач та досягненні поставлених цілей. Інструментарій покликаний забезпечувати вчасне прийняття управлінських рішень, запобігати появі невизначеностей. Від широти інструментарію, що використовується, напряду залежить успішність управління екологічною безпекою та досягнення стратегічних цілей.

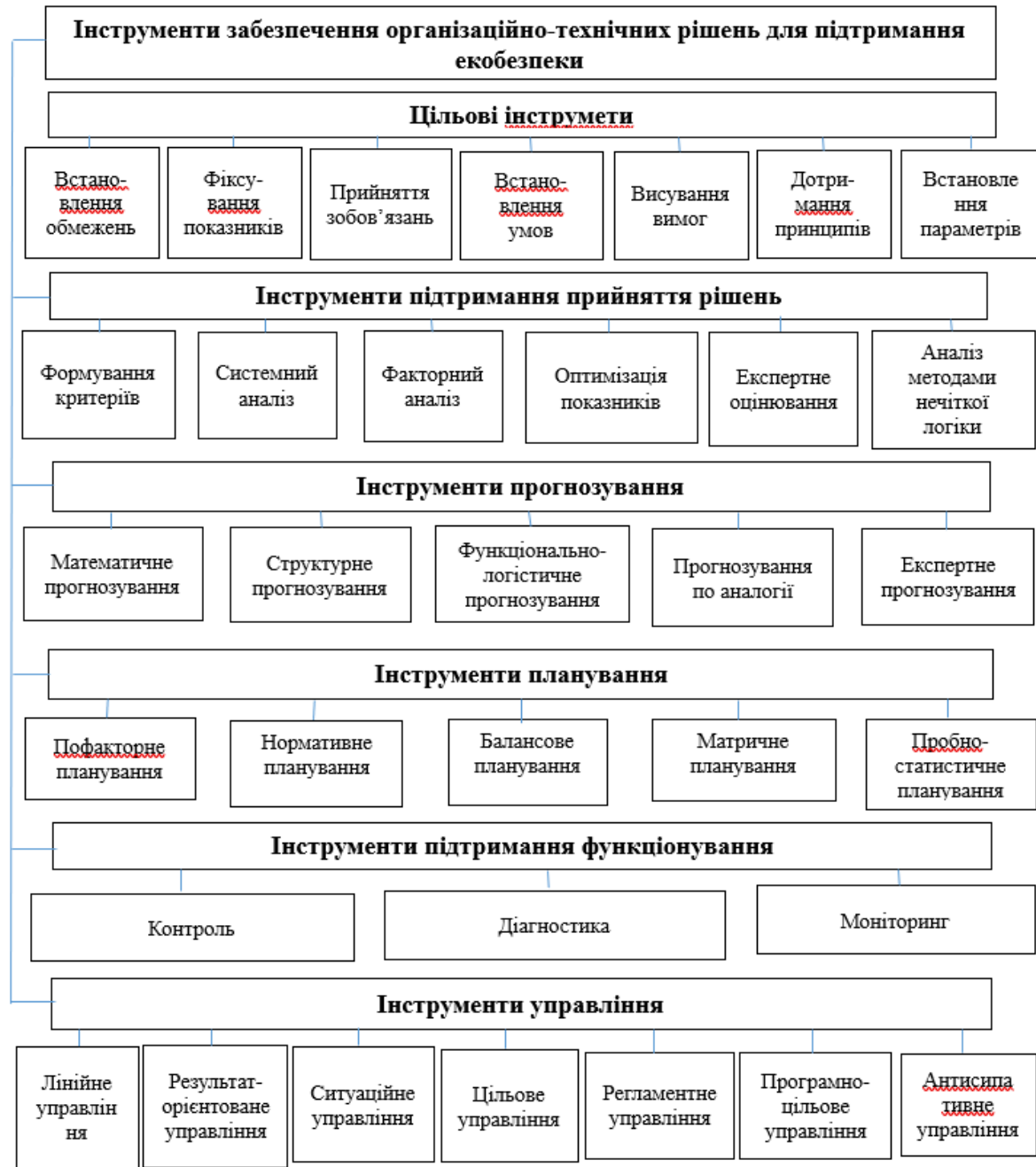


Рис. 1.4. Блок-схема можливого інструментального забезпечення організаційно-технічних рішень для підтримання екологічної безпеки при функціонуванні інфраструктури водовідведення

Fig. 1.4. Flowchart of the possible instrumental provision of organizational and technical solutions for maintaining environmental safety during the functioning of the drainage infrastructure

Висновки. У зв'язку з ситуацією, яка склалася у нашій країні та, беручи до уваги, критичний екологічний стан поверхневих водних джерел та підвищені вимоги до якості водопровідної води модернізація споруд водопостачання та водовідведення, удосконалення технологій водопідготовки та очищення стоків є актуальними завданнями. Для їх виконання необхідним є розроблення методологічних основ прийняття рішень для формування організаційно-технічних заходів з модернізації та відновлення інфраструктури водовідведення на засадах екобезпечності.

Обґрунтовано та розроблено структуру теоретико-методологічного підходу до формування організаційно-технічних заходів з управління екологічною безпекою функціонування інфраструктури водовідведення.

Сформульовано та систематизовано основні фактори впливу на результати управління екологічною безпекою. Розроблено структурну модель взаємодії між факторами. На підставі сформульованих критеріїв розроблено ієрархічну систему показників, що визначають ефективність організаційно-технічних заходів управління екологічною безпекою інфраструктури водовідведення.

Також у статті розроблено методичні підходи до прийняття організаційно-технічних рішень з управління екологічною безпекою, показано шляхи підвищення ефективності роботи інфраструктури водовідведення, а також розроблено блок-схему можливого інструментального забезпечення організаційно-технічних рішень для підтримання екологічної безпеки.

Список використаних джерел:

1. Сергій Карелін. (2022). Стійкі системи водопостачання. Готовність до надзвичайних ситуацій та умов воєнного стану. Рекомендації для територіальних громад. USAID від американського народу, – 19 с. URL: <https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/824/Water-Supply-Resilience.pdf>
2. Матеріали робочої групи «Аудиту збитків, понесених внаслідок війни». (2022). Проект Плану відновлення України. Національна рада відновлення України від наслідків війни, – 178 с. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>
3. Закон України «Про критичну інфраструктуру» від 16 листопада 2021 року № 1882-IX (Із змінами, внесеними згідно із Законом № 2684-IX від 18.10.2022)
4. Асоціація міст України «Спільними зусиллями». (2023). Методичні рекомендації у сфері планування і організації відновлення муніципальної інфраструктури, – 49 с. URL: https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/850/vidnovlennya_2023.pdf
5. Віктор Хоружий, Тетяна Хомутецька, Ігор Недашковський. (2021). Модернізація споруд в системах водопостачання з поверхневих джерел. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, вип. 37, С. 74-83. DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.74-83>
6. Волошин М.М. (2022). Схема оптимізації та реконструкції водопровідних мереж у селищі міського типу Козацьке Бериславського району Херсонської області. Таврійський науковий вісник: Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології. №1 С. 154-162. DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.1.17>
7. Одеська Обласна Рада. (2021). Про затвердження регіональної програми «Питна вода Одещини» на 2021-2024 роки. <https://oblrada.od.gov.ua/wp-content/uploads/24-6-VIII.pdf>
8. КП «Луцькводоканал». (2022). Реконструкція очисних споруд села Липляни в дії – попри війну робота над міжнародним проектом перейде в стадію виконання. URL: <https://vd.lutsk.ua/news/rekonstrukciya-ochysnyh-sporud-sela-lyplyany-v-diyi-popry-viynu-robotu-nad-mizhnarodnym>
9. Крилова І. І. (2018). Аналіз сучасного стану сфери водопостачання та водовідведення в Україні. – Інвестиції: Практика та досвід. – с. 118-125.
10. Шаманський С. Й., Бойченко С. В. (2018). Інноваційні екологічно безпечні технології у водовідведенні. Монографія. – К.: Видавництво «Центр учбової літератури». – 320 с.
11. Указ Президента України Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14 вересня 2020 року № 392/2020 «Про Стратегію національної безпеки України».
12. Суходоля О. М., Бобро Д. Г., Іванюта С. П., Кондратов С. І. (2019). Організаційні та правові аспекти забезпечення безпеки і стійкості критичної інфраструктури України: аналіт. доп. – К. : НІСД. – 224 с.
13. Ірина Бабаніна. (2022). Зруйнована інфраструктура водопостачання та водовідведення на Сході та Півдні України. Аналітична записка. Екологія, право, людина. – 41 с. URL: http://epl.org.ua/wp-content/uploads/2023/02/rujnuvannya-infrastruktury_vychytana-versiya.pdf
14. Міністерство з питань реінтеграції тимчасово окупованих територій. (2023). Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії росії проти України за рік від початку повномасштабного вторгнення. – 50 с. URL: <https://kse.ua/wp->

- [content/uploads/2023/03/UKR_Feb23_FINAL_Damages-Report-1.pdf](#)
15. Єрменчук О. П. (2018). Основні підходи до організації захисту критичної інфраструктури в країнах Європи: досвід для України : монограф. Дніпро: Дніпроп. держ. ун-т внутр. справ. 180 с.
 16. Nezbrzytska I., Shamanskyi S., Pavliukh L., Kharchenko G. (2022). Assessment of inorganic nitrogen and phosphorous compounds removal efficiency from different types of wastewater using microalgae cultures. *Oceanological and Hydrobiological Studies*. Vol. 51 (1). P. 45-52. DOI: <https://doi.org/10.26881/oahs-2022.1.05>
 17. Димченко О. В. (2009). Житлово-комунальне господарство в реформаційному процесі: аналіз, проектування, управління: монографія. Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ. – 356 с.
 18. Побережець О. В. (2016). Теоретико-методологічні та практичні засади дослідження системи управління результатами діяльності промислового підприємства : монографія. Херсон: Видавництво: Грінь Д.С. – 500 с.
 19. Pavliukh, L., Shamanskyi, S., Boichenko, S. and Jaworski, A. (2021), "Evaluation of the potential of commercial use of microalgae in the world and in Ukraine", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 93 No. 3, pp. 429-436. <https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2020-0181>
 20. Shamanskyi S., Boichenko S., Pavliukh L. (2021). Estimated Efficiency of Biogenic Elements Removal from Waste Water in the Ideal Displacement Photobioreactor. In: Zaporozhets A., Artemchuk V. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 346. Springer, Cham. P. 347-361. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_21

References:

1. Sergey Karelin. (2022). Stijki sistemi vodopostachannja. Gotovnist' do nadzvichajnih situacij ta umov voennogo stanu. Rekomendacii dlja teritorial'nih gromad. USAID vid amerikans'kogo narodu (Sustainable water supply systems. Preparedness for emergencies and martial law conditions. Recommendations for territorial communities. USAID from the American people) p. 19. (in Ukrainian). URL: <https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/824/Water-Supply-Resilience.pdf>
2. Materiali robochoї grupi «Auditu zbitkiv, ponesenih vnaslidok vijni». (2022). Proekt Planu vidnovlennja Ukraїni. Nacional'na rada vidnovlennja Ukraїni vid naslidkiv vijni (Project of the Recovery Plan of Ukraine. The National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War), – p. 178. (in Ukrainian). URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>
3. Zakon Ukraїni «Pro kritichnu infrastrukturu» vid 16 listopada 2021 roku № 1882-IX (Iz zminami, vnesenimi zgidno iz Zakonom № 2684-IX vid 18.10.2022) (Law of Ukraine "On Critical Infrastructure" dated November 16, 2021 No. 1882-IX (Amended by Law No. 2684-IX dated October 18, 2022)). (in Ukrainian).
4. Asociacija mist Ukraїni «Spil'nimi zusilljami». (2023). Metodichni rekomendacii u sferi planuvannja i organizacii vidnovlennja municipal'noї infrastrukturi (Methodological recommendations in the field of planning and organizing the restoration of municipal infrastructure), – p. 49. (in Ukrainian). URL: https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/850/vidnovlennja_2023.pdf
5. Viktor Khoruzhij, Tetyana Khomutetska, Ihor Nedashkovskiy. (2021). Modernizacija sporud v sistemah vododpostachannja z poverhnevih dzherel. Problemi vodopostachannja, vodovidvedennja ta gidravliki (Modernization of structures in water supply systems from surface sources. Problems of water supply, drainage and hydraulics), Vol. 37, p. 74-83. (in Ukrainian). DOI: <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2021.37.74-83>
6. Voloshyn M.M. (2022). Shema optimizacii ta rekonstrukcii vodoprovodnih merezh u selishhi mis'kogo tipu Kozac'ke Berislavs'kogo rajonu Hersons'koї oblasti (The scheme of optimization and reconstruction of water supply networks in the urban-type village of Kozatske, Beryslav district, Kherson region). *Taurian scientific bulletin: Hydrotechnical construction, water engineering and water technologies*. No. 1, p. 154-162. (in Ukrainian). DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.1.17>
7. Odesa Regional Council. (2021). Pro zatverdzhennja regional'noї programi «Pitna voda Odeshhini» na 2021-2024 roki (On the approval of the regional program "Drinking water of Odesa" for 2021-2024). (in Ukrainian). <https://oblrada.od.gov.ua/wp-content/uploads/24-6-VIII.pdf>
8. КР "Lutskvodokanal". (2022). Rekonstrukcija ochisnih sporud sela Lipljani v diї – popri vijnu robota nad mizhnarodnim proektom perejde v stadiju vikonannja (Reconstruction of treatment facilities in the village of Lipljany in action - despite the war, work on the international project will enter the implementation

- stage). (in Ukrainian). URL: <https://vd.lutsk.ua/news/rekonstrukciya-ochysnyh-sporud-sela-lyplyany-v-diyi-popry-viynu-robotu-nad-mizhnarodnym>
9. Krylova I. I. (2018). Analiz suchasnogo stanu sferi vodopostachannja ta vodovidvedennja v Ukraïni. – Investicii: Praktika ta dosvid (Analysis of the current state of water supply and drainage in Ukraine. – Investments: Practice and experience). – p. 118-125. (in Ukrainian).
 10. Shamansky S. Y., Boychenko S. V. (2018). Innovacijni ekologichno bezpechni tehnologii u vodovidvedenni. Monografija (Innovative environmentally safe technologies in water drainage. Monograph.) – K.: Publishing House "Center of Educational Literature". – p. 320. (in Ukrainian).
 11. Ukaz Prezidenta Ukraïni Pro rishennja Radi nacional'noï bezpeki i oboroni Ukraïni vid 14 veresnja 2020 roku № 392/2020 «Pro Strategiju nacional'noï bezpeki Ukraïni» (Decree of the President of Ukraine On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine dated September 14, 2020 No. 392/2020 "On the National Security Strategy of Ukraine"). (in Ukrainian).
 12. Sukhodolya O.M., Bobro D.G., Ivanyuta S.P., Kondratov S.I. (2019). Organizacijni ta pravovi aspekti zabezpechennja bezpeki i stijkosti kritichnoï infrastrukturi Ukraïni: analit. dop. (Organizational and legal aspects of ensuring the safety and stability of critical infrastructure of Ukraine: analyst. add.)– K. : NISD. – p. 224. (in Ukrainian).
 13. Iryna Babanina. (2022). Zrujnovana infrastruktura vodopostachannja ta vodovidvedennja na Shodi ta Pivdni Ukraïni. Analitichna zapiska. Ekologija, pravo, ljudina (Ruined water supply and drainage infrastructure in the East and South of Ukraine. Analytical note. Ecology, law, man.). – p. 41. (in Ukrainian). URL: <http://epl.org.ua/wp-content/uploads/2023/02/rujnuvannya-infrastruktury-vychytana-versiya.pdf>
 14. Ministry of Reintegration of Temporarily Occupied Territories. (2023). Zvit pro prjami zbitki infrastrukturi vid rujnuvan' vnaslidok vijs'kovoï agresii rosiïproti Ukraïni za rik vid pochatku povnomashtabnogo vtorgnennja (Report on the direct damage to the infrastructure from the destruction caused by Russia's military aggression against Ukraine a year after the start of the full-scale invasion). – p. 50. (in Ukrainian). URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/03/UKR_Feb23_FINAL_Damages-Report-1.pdf
 15. Yermenchuk O. P. (2018). Osnovni pidhodi do organizacii zahistu kritichnoï infrastrukturi v kraïnah Ćvropi: dosvid dlja Ukraïni: monograf (Basic approaches to the organization of critical infrastructure protection in European countries: experience for Ukraine: monograph). Dnipro: Dniprop. state University of Internal Affairs affairs. p. 180.
 16. Nezbyraska I., Shamanskyi S., Pavliukh L., Kharchenko G. (2022). Assessment of inorganic nitrogen and phosphorous compounds removal efficiency from different types of wastewater using microalgae cultures. Oceanological and Hydrobiological Studies. Vol. 51 (1). P. 45-52. DOI: <https://doi.org/10.26881/oahs-2022.1.05>
 17. Dymchenko O. V. (2009). Zhitlovo-komunal'ne gospodarstvo v reformacijnomu procesi: analiz, proektuvannja, upravlinnja: monografija (Housing and communal economy in the reformation process: analysis, design, management: monograph). Khark national Acad. urban farm – Kh.: KhNAMG. – p. 356.
 18. Poberezhets O. V. (2016). Teoretiko-metodologichni ta praktichni zasadi doslidzhennja sistemi upravlinnja rezul'tatami dijial'nosti promislovogo pidpriemstva : monografija (Theoretical, methodological and practical principles of the study of the system of managing the results of the industrial enterprise: monograph). Kherson: Publishing house: Grin D.S.– p. 500.
 19. Pavliukh, L., Shamanskyi, S., Boichenko, S. and Jaworski, A. (2021), "Evaluation of the potential of commercial use of microalgae in the world and in Ukraine", Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 93 No. 3, pp. 429-436. <https://doi.org/10.1108/AEAT-08-2020-0181>
 20. Shamanskyi S., Boichenko S., Pavliukh L. (2021). Estimated Efficiency of Biogenic Elements Removal from Waste Water in the Ideal Displacement Photobioreactor. In: Zaporozhets A., Artemchuk V. (eds) Systems, Decision and Control in Energy II. Studies in Systems, Decision and Control. Vol. 346. Springer, Cham. P. 347-361. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69189-9_21

UDC 621.039.58

DOI: <http://doi.org/10.32347/tb.2023.1-38.0201>**Olena Voloshkina,**

Doctor of Engineering,

Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies,
Kyiv National University of Construction and Architecture

avenue 31 Povitroflotskyi, Kyiv, 03037, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3671-4449>E-mail: e.voloshki@gmail.com**Iryna Korduba,**

Doctor of Philosophy,

Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies,
Kyiv National University of Construction and Architecture

avenue 31 Povitroflotskyi, Kyiv, 03037, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465>E-mail: uaror-korduba@ukr.net**Olena Zhukova,**

Doctor of Philosophy,

Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies,
Kyiv National University of Construction and Architecture

avenue 31 Povitroflotskyi, Kyiv, 03037, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0662-9996>E-mail: elenazykova21@gmail.com**THE RELATIONSHIP OF GLOBAL CLIMATE CHANGES AND THE OPERATION OF OPEN COOLING SYSTEMS OF ENERGY FACILITIES OF UKRAINE**

ABSTRACT. *This study provides an assessment of the possible impact of climate change on increasing the temperature of water in the sources from which water is taken for open technical cooling systems. In recent years, there has been a decrease in the efficiency of nuclear reactors at Ukraine's nuclear power plants in the hot summer months of the year. Using the example of cooling ponds of operating nuclear power plants, an assessment of the mutual influence of air temperature indicators and the temperature of surface water for cooling was made. Based on the monitoring temperature data of the cooling reservoirs of the NPP of Ukraine in different months of 2020, as one of the hottest years of observations, the equations of the correlation dependences between the temperature indicators of the surface air and the temperature of the cooling water were obtained. In the OriginPro8 software environment, which is widely used as an industrial standard for data collection and visualization, a climatic forecast of the atmospheric air in the territory of Ukraine was made and a forecast dependence of the water rise in water bodies was established for the period until 2160. The obtained forecast values of the relative total efficiency of the NPP reactors of Ukraine for different periods until 2050, which indicates a gradual decrease in the output power in the nuclear power industry of Ukraine. This approach to the analysis of the operation of cooling ponds can be acceptable for evaluating the operation of thermal plants and other industrial facilities that have an open cooling pond and can serve as support for making management decisions in the context of global climate change and for preventing the risks of emergency situations on the object.*

Key words: energy facilities, cooling water temperature, climate changes, reactor efficiency.

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ТА РОБОТИ ВІДКРИТИХ СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ УКРАЇНИ

АНОТАЦІЯ. *В данному дослідженні приводиться оцінка можливого впливу змін клімату на підвищення температурних показників води в джерелах, з яких здійснюється водозабір для відкритих технічних систем охолодження. Останніми роками спостерігається зниження ефективності роботи атомних реакторів на АЕС України в літні спекотні місяці року. На прикладі роботи ставків-охолоджувачів діючих АЕС зроблена оцінка взаємовпливу температурних показників повітря і температури поверхневих вод для охолодження. На основі моніторингових температурних даних водойм-охолоджувачів АЕС України в різні місяці 2020 року, як одного з найбільш спекотних років*

спостережень, були отримані рівняння кореляційних залежностей між температурними показниками приземного повітря та температурою води для охолодження. В програмному середовищі OriginPro8, що широко використовується як промисловим стандартом для збору та візуалізації даних зроблено кліматичний прогноз атмосферного повітря на території України та встановлено прогнозну залежність підвищення води у водних об'єктах на період до 2160 р. Отримані прогнозні значення відносної сумарної ефективності роботи реакторів АЕС України різні періоди до 2050 року, що свідчить про поступове зниження вихідної потужності в атомній енергетиці України. Даний підхід до аналізу роботи ставків –охолоджувачів може бути прийнятним для оцінки роботи теплових станцій та інших промислових об'єктів, що мають відкритий ставок-охолоджуюча та може слугувати підтримкою для прийняття управлінських рішень в умовах глобальної зміни клімату та для для запобігання ризиків виникнення надзвичайних ситуацій на об'єкті.

Ключові слова: енергетичні об'єкти, температура вод охолодження, зміни клімату, ефективність роботи реактора.

1. INTRODUCTION. Many domestic and foreign authors dealt with the issue of the inter-relationship of surface water quality, changes in the water regime of water bodies and water supply depending on global climate changes [1-3, etc.]. Thus, in work [3], the water balance method was used to assess possible changes in water resources of Ukraine based on the results of air temperature forecasting. A 25–50% decrease in water flow was predicted at the end of the current century in Ukraine across four regions of Ukraine according to the official regional division used by the Ukrainian Hydrometeorological Center [4]. Scientific studies [5-7] contain assessments of the probable vulnerability of one of the main water users - the energy industry, with recommendations on its adaptation to climate change. The abnormal heat of recent years affected not only the qualitative and quantitative characteristics of Ukraine's water resources, but also the overall efficiency of cooling systems. As an alternative, global research offers closed water circulation systems or dry cooling technologies. As for nuclear energy, it is increasingly possible to hear opinions about alternative options for cooling systems for the successful development of the industry, which are based not only on the general impact on the environment, but also on assessment and analysis consequences of climate change [8,9].

Global nuclear energy is currently developing against the background of a considerable list of unsolved dangerous environmental problems, and Russian aggression in Ukraine forces us to reconsider the sustainability of nuclear energy. On the territory of Ukraine, we have reactors of the VVER-1000 type, and decommissioning of the latter is planned by 2050. Even without extending their service life, research aimed at evaluating the efficiency of operating reactors depending on the water temperature of cooling reservoirs is relevant. The purpose of this work is aimed precisely at such studies.

2. OVERVIEW OF EXISTING SOLUTIONS. Existing models of the dependence of the use of water for cooling and the energy produced are based on the determination of the coefficient of consumption of fresh water in the system [6, 10]. Many studies, based on the results of studies on accident safety after the Fukushima accident, devote many works to the safety and reliability of the cooling management of the core and protective shell in reactors of various designs [11]. The heat load of the cooling system in work [7] is represented by the Senki diagram, which is based on balance studies, the balance ratio, and the coefficient of net electricity production is used to determine the efficiency of a nuclear power plant. The input heat flux in this approach consists of three output fluxes: net power generation, heat load and cooling systems, and heat loss. On the basis of this approach, it is possible to obtain the coefficient of consumption of fresh water in the systems, which makes this approach workable when drawing up the water balance in the technological system of reactors. A number of studies are devoted to hybrid cooling systems combining wet and dry cooling approaches.

But in the study [12] it is noted that despite the existence of many varieties of hybrid cooling, all of them are, in fact, a compromise between a wet tower and dry cooling. Works [13,14] describe detailed models of the processes of the most modern power plants for comparing various aspects of water use. A number of models presented in works [15,16] apply the assessment of the impact of

carbon absorption on water use, but these models have a high level of detail in the assessment of water use and the potential consequences of the introduction of new technologies. The amount of water required for cooling a station with a VVER-1000 reactor can be found using the equations given in [17] and convenient to use.

3. MAIN PART. The following algorithm was used in the research: changes in water temperature indicators depending on air temperature were studied and correlation dependences between these indicators, which are usually linear functions, were constructed [10]; on the basis of the obtained correlation dependences, we find the coefficients of the Mohseni equation [18]. This equation allows for the estimation of the effect of the increase in water temperature and relates the waste heat at the plant to the demand for cooling water based on the efficiency data and the generated electricity, and for closed cooling systems the fraction of the waste heat released to the air is determined.

To determine the output power, equation (1) was used for open cooling systems, which is given in [10] with practical restrictions on the operation of the reactor, such as: the maximum permissible water intake, the maximum permissible temperature increase of the return water, and, finally, the overall efficiency of the installation.

$$KW_{max} = \frac{A \cdot S_{max} \cdot c \cdot v \cdot Q_{max}^F}{h \cdot 3.6 \cdot \left(\frac{1 - \eta_{total}}{\eta_{electrical}} \right) \cdot (1 - \alpha)} \quad (1)$$

Where: KW_{max} – the maximum installed power in (kW); Q_{max}^F - the need for cooling water (m³); h – working hours in (hours); 3.6 is the coefficient for converting kWh into megajoules; η_{total} — total efficiency in (%); η_{electrical} - electrical efficiency in (%); α - share of spent heat not removed by cooling water in (%); v - density of water in (t/m³); c – specific isobaric heat capacity of water in (MJ/t K); AS_{max} – is the maximum permissible increase in the temperature of the cooling water in (K).

To study the cooling tanks of nuclear power plants in Ukraine, we used the OriginPro8 software environment, and to construct the correlation dependences for the cooling reservoirs of the Khmelnytsky NPP, the Rivne NPP and the South Ukrainian NPP between the water temperature and the air temperature of one of the hottest years in the last decade - 2020. The data of the correlation dependences, based on which the coefficients in equations (1) and the Mohseni equation can be identified, are given in Table 1. The values of the parameters for calculating the need for cooling water are presented in Table 2.

Table 1 - Forecast and estimation parameters according to equation (2)

Object	Tashlitsky Reservoir (PNPP)	Netishyn Reservoir (KHNPP)	Styr River (PNPP)
Нахил (м)	1,6249	1,1801	1 . 2337
γ = (4 × m / α - μ)	0,382	0,2247	0 . 2234
β - (°C).	8	7.5	1 2
α - (°C)	33	24	25
μ - (°C)	14	3	3

Table 2. Values of parameters for calculating the need for cooling water

Parameters	
α = 0.01	AS = 10 K
h = 24*30 = 720	EZ = 3
η _{total} = 0,75-0,85	ω = 0.975
η _{electrical} = 0.33	(1 - β) = 0.013696

The analysis of changes in temperature indicators on the territory of Ukraine during the period 1881-2020 is presented in Fig. 1. and Fig. 2.

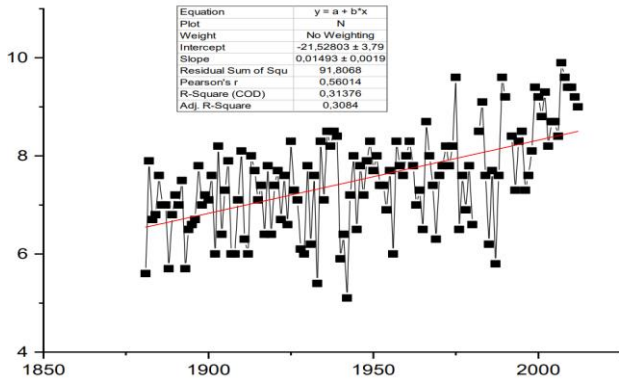


Fig. 1 Correlation dependence of average annual temperature changes of the atmospheric surface air on the territory of Ukraine in the period 1881-2020.

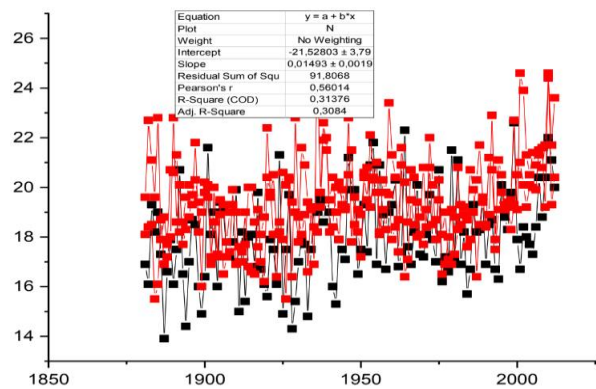


Fig. 2. Correlation dependence of average monthly temperature changes of atmospheric surface air in the summer months on the territory of Ukraine in the section 1881-2020.

Modeling of the forecast data of the average annual temperature of atmospheric air for the period until 2160 is presented, respectively, in the graphs of Fig. 3 and Fig. 4.

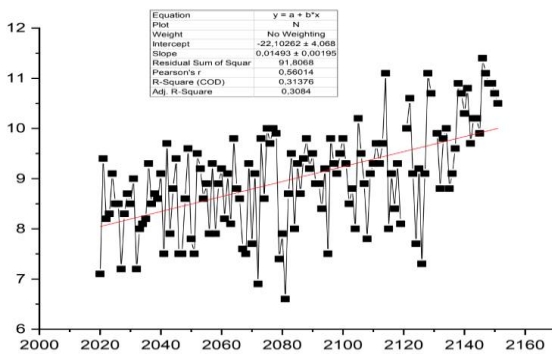


Fig. 3. Modeling of forecast data of the average annual atmospheric temperature for the period up to 2160

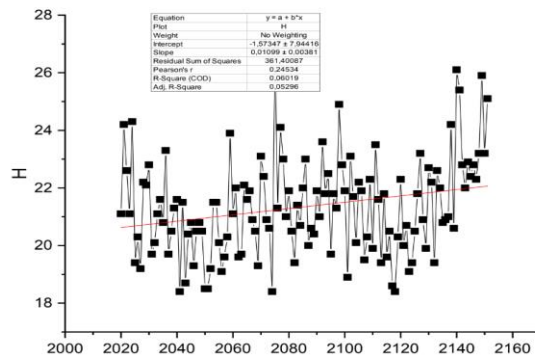
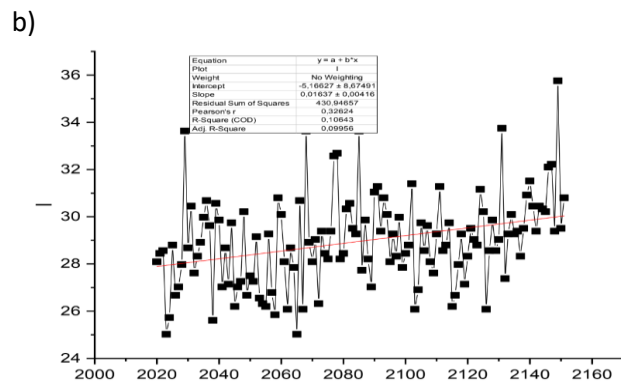
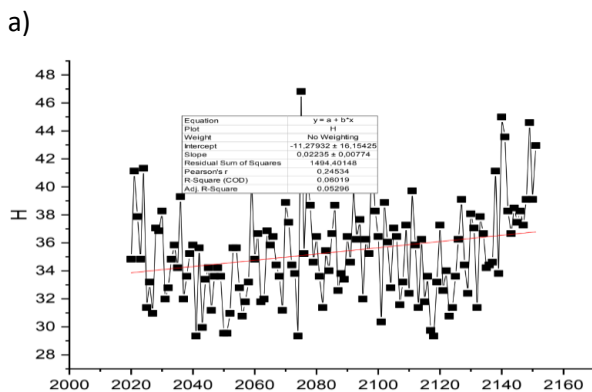


Fig. 4. Modeling forecast data of the average monthly air temperature in July for the period until 2160

Modeling of forecast water temperatures of cooling reservoirs is presented in the graph of Fig.

5.



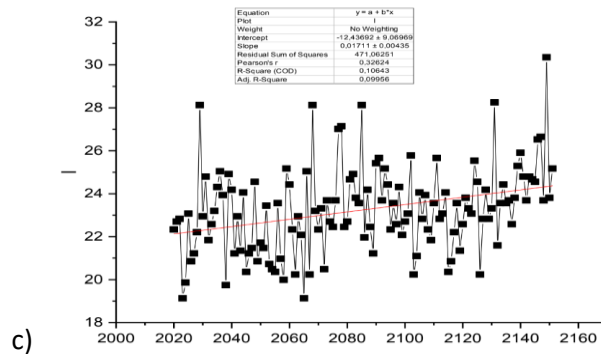


Fig. 5. Modeling of forecast water temperatures of cooling reservoirs of the NPP of Ukraine: a) - Tashlitsky Reservoir, б) - Netishyn reservoir, c) - Styr River

The equation of the relationship between the temperature of the surface layer of the air and the cooling water is linear with the corresponding correlation coefficients: Tashlitsky Reservoir - 0.8278, Netishyn Reservoir - 0.9408 and cooling water of the Rivne NPP (Styr River) - 0.8759.

When calculating the efficiency of the reactors according to equation (1), practical restrictions are imposed, such as: the maximum permissible water intake, the maximum permissible temperature increase of the return water, etc.

Taking into account the terms of decommissioning of reactors at the nuclear power plants of Ukraine, it is sufficient, in our opinion, to make a forecast of the efficiency of their work for the period until 2050. Calculation data showed that in the period 2023-2030, if the current trend of increasing climatic indicators is maintained, the value of the coefficient of the total power of nuclear reactors in the summer months is 0.40; in the period of 2031-2040 - is 0.38 and in the period of 2041-2050 it may reach 0.35 and below.

4. CONCLUSIONS. One of the main negative factors affecting the reduction of energy efficiency of NPPs in Ukraine is open cooling systems, when higher efficiency in the technological process can be achieved if the temperature of the suitable water is lower. Nuclear power plants of Ukraine require a fairly large amount of water for the process of cooling waste and removing heat. Analysis of the impact of global climate change on the presence of cooling through open cooling ponds showed that a gradual increase in the temperature of cooling water in the coming decades will lead to a decrease in the efficiency of reactors at nuclear power plants in Ukraine. In order to avoid the risks of emergency situations at the station and in the area of its influence, it is necessary to have a tool for predictive assessment of the efficiency of the cooling systems in conditions of a gradual increase in the temperature indicators of water resources that enter the technological process for making strategic decisions regarding the transition to "clean" energy. and new generations of reactors.

REFERENCES:

1. **Moyce W., Mujere N.** (2017). Climate Change Impacts on Surface Water Quality. Environmental Sustainability and Climate Change Adaptation Strategies Copyright. Issue 2017, pp. 322-341. DOI: 10.4018/978-1-5225-1607-1.ch012
2. **Snizhko S., Shevchenko O., Didovets Y.** (2021). Analysis of the impact of climate change on water resources of Ukraine (full report on project results). Ecodia Center for Environmental Initiatives, 2021, 68 p.
3. **Snizhko S.** (2012). Assessment of possible changes in water resources of local runoff in Ukraine in the 21st century. Water management of Ukraine. No. 6 (102), pp. 8–16.
4. Zoning of the territory of Ukraine, according to the order of the State Hydrometeorology Committee of Ukraine of March 20, 1997 No. 14 "On the Terminology of the Territorial Division of Ukraine in Forecasts and Warnings."
5. **Ivanyuta S.P., Kolomiets O.O., Malinovska O.A., Yakushenko L.M.** (2020). Climate Change: Implications and Adaptation: An Analysis. report. Kyiv, Ukraine. 110 p.

6. **Klett, M.G., Kuehn, N.J., Shoff, R.L., Weissman, W., and White, J.** (2007). Power Plant Water Use and Loss Study, National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA. 120 p.
7. **Migre R.** (2002). Water consumption for electricity generation - the next half century. Research Institute of Electric Power. Water and sustainable development (volume 3), No. 1006786.
8. **Vashchenko V.M., Korduba I.B., Kryska Y.M., Loza E.A.** (2016). Analysis of the environmental safety of the cooling reservoir of the ChNPP in the conditions of an earthquake tornado. Environmental Sciences, No 14-15, pp. 5-10.
9. **Korduba I.B.** (2022). Nuclear and environmental safety of the world's nuclear energy at the stage of the fourth global energy transition. Global and regional environmental problems, No. 2 (26), p. 7-13. DOI: 10.31471/2415-3184-2022-2(26)-7-14
10. **Rutberg, M., Delgado, A., Herzog, H., and Goniem, A.** (2011). A General Model of System-Level Water Use in Power Plants and Its Application to Regional Water Use Assessment”, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Denver, Colorado, 11-17 November 2011, ASME, New York, p. 67-75.
11. Nuclear energy is dirty energy (and does not fit into a “clean energy standard”). Electronic resource: <https://www.nirs.org/wp-content/uploads/factsheets/nuclearenergyisdirtyenergy2014.pdf>.
12. **Ashwood A., Bharathan D.** (2011). Hybrid Cooling Systems for Low-Temperature Geothermal Power Production. National Renewable Energy Laboratory, Boulder, CO. Report no. NREL/TP-5500-48765.
13. **DiPietro, P., Gerdes, K., Nichols, K.** (2009). Water requirements for existing and new thermal power plant technologies. National Laboratory of Energy Technologies, report no. DOE/NETL-402/080108.
14. Unsuitability Energy Balance and Annual Environmental Information Data (2010) US Energy Information Administration, Washington, DC.
15. **Zhai H., Rubin E.** (2010). Performance and cost of wet and dry cooling systems for pulverized coal power plants with and without carbon capture and storage. Energy Policy, 38 (10), 5653-5660.
16. **Zhai H., Rubin E., Versteeg P.** (2011). Water use in pulverized coal power plants with post-combustion carbon capture and storage. Environment, 45 (6), 2479-2485.
17. ECOFYS Netherlands BV (2014). Electronic resource: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2015-04/Final%2520report%2520-November%25202014_0.pdf
18. **Mohseni, O., Stefan, H., and Erickson, T.** (1998) A nonlinear regression model for daily stream temperatures. Water resources research, number 2685-2692, p. 170–176.

Наукове видання

ТЕХНІКА БУДІВНИЦТВА

Збірник наукових праць

Випуск 1(38)

Підписано до друку

Умовн. друк. арк. 14

Формат 60×84 1/8

Обл.-вид. арк. 12.5

Папір офсетний. Друк різogr.

Тираж 100. Зам. №

Адреса редакції: 02000, м.Київ, проспект Повітрофлотський, 31, кім. 603б.
тел. +38 044 241-55-48, e-mail: motp@knuba.edu.ua