

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ЗАХИСТ АТМОСФЕРИ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ ВІД ПИЛОВИХ ВИКИДІВ ПРИБИ ВИРОБНИЦТВІ ГАЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

М. М. Мадані¹¹Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна

УДК 621.928.9(3)

DOI: 10.52363/2522-1892.2023.1.2

Отримано: 21 лютого 2023

Прийнято: 27 квітня 2023

Cite as: Madani M. (2023). Protection of the atmosphere of urbanized areas from dust emissions during the manufacturing of aerated concrete structures. *Technogenic and ecological safety*, 13(1/2023), 11–19. doi: 10.52363/2522-1892.2023.1.2

Анотація

У статті дається вирішення актуального завдання щодо забезпечення захищеності природного середовища та життєво важливих інтересів людини від негативних впливів пилових викидів, що утворюються при виробництві газобетону та будівельних виробів на його основі. Встановлено, що при використанні традиційних систем очищення пилових викидів циклонами в атмосферне повітря викидається пил, до 100 % маси якого припадає на частинки з розмірами до 20 мкм. При цьому їхній медіанний діаметр дорівнює 12 мкм, відсоток частинок з розмірами менше 10 мкм (PM₁₀) становить 40 %, відсоток частинок з розмірами менше 2,5 мкм (PM_{2,5}) – 0,5 %. Відсоток частинок в атмосферному повітрі біля промайданчика влітку коливаються: для PM₁₀ – від 12 % до 40 %; для PM_{2,5} – від 0,3 % до 0,5 %. На межі санітарно-захисної зони ці значення становлять 80 % та 0,5 % відповідно.

Для зниження надходження пилу в атмосферу при виробництві газобетону та будівельних виробів на його основі запропоновано два варіанти компонування систем знепилювання викидів з двома послідовно встановленими пиловловлювачами із зустрічними закрученими потоками, двома додатковими апаратами менших розмірів, з організацією відсмоктування з бункера основного пиловловлювача другого ступеня та із бункера одного з додаткових апаратів. Використання запропонованої системи пилоочищення показало, що вміст часток PM₁₀ у потоці, що викидається в атмосферне повітря скоротився на 40 %, вміст частинок PM_{2,5} – на 20 %. При цьому викид пилу в атмосферу скоротився у 8,9 рази.

Встановлені залежності, що характеризують ступінь зниження викидів пилу в атмосферу, а також виявлено діапазони зміни режимно-конструктивних параметрів запропонованих систем пилоочищення, при яких забезпечується найменше пилонадходження в навколишнє середовище та найменші енерговитрати на проведення процесів обезпилювання викидів під час виробництва газобетону та будівельних конструкцій на його основі.

Ключові слова: очистка пилових викидів, технології захисту атмосфери, техноекологія, урбанізовані території.

Постановка проблеми

Газобетон є універсальним сучасним будівельним матеріалом, відрізняється довговічністю та високою міцністю до стискання, не горить і не підтримує горіння. Застосування газобетону при зведенні як невеликих будинків, так і висотних будівель, а також торгових та розважальних комплексів дозволяє скоротити час будівництва та капітальні витрати. Тому в даний час виробництво газобетону та будівельних конструкцій на його основі знаходить у нашій країні все ширше застосування.

Разом з тим, підприємства з виробництва газобетону та газобетонних будівельних конструкцій, як і підприємства з виробництва інших будівельних матеріалів, розташовуються в межах населених пунктів і характеризуються великими, значно перевищуючими нормативи гранично допустимих викидів, викидами пилу в довкілля урбанізованих територій.

За умовами технології для зниження надходження пилу у міське повітряне середовище під час виробництва газобетону, можливе лише сухе очищення пилових викидів і з цією метою найчастіше використовуються циклони. Проте досвід експлуатації систем знепилення на підприємствах галузі показує, що установки пилоочищення, що застосовуються в даний час, не

забезпечують необхідного ступеню очистки пилових надходжень. Особливо це відноситься до дрібнодисперсних частинок PM₁₀ та PM_{2,5}, вміст яких в атмосферному повітрі населених пунктів на даний час регламентується досить суворо. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на розробку рішень, що забезпечують високий рівень скорочення надходжень пилу в атмосферне повітря при виробництві газобетону та газобетонних будівельних конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питаннями захисту навколишнього середовища від негативного впливу пилових викидів займався багато дослідників – Дадак Ю. Р., Батлук В. А., Ляшеник А. В., Климець В. В., Козій І. С., Буров О. О., Карамушко А. В., Гаджиев Е. Н. та інші [1–8]. У деяких із робіт цих авторів [9–12] наводяться схеми компонування систем знепилювання викидів від організованих джерел, які передбачають використання практично всіх типів пиловловлювачів (сухих та мокрих циклонів, скрубєрів, рукавних фільтрів та електрофільтрів). Проте, як зазначалося, у виробництві газобетону переважно застосовуються сухі методи очищення.

Для очищення пилових викидів у цехах з виробництва газобетону застосовуються сухі методи, тому що це зумовлено технологією виробництва, і для цієї мети найчастіше

використовуються циклони. Однак, незважаючи на простоту конструкції, надійність роботи, малі габаритні розміри, низькі енерговитрати та експлуатаційні витрати, ці апарати, навіть при двоступінчастій установці, не забезпечують необхідного ступеня скорочення викидів в атмосферу пилу, що утворюється під час виробництва будівельних матеріалів. У багатьох випадках це призводить до перевищення гігієнічних нормативів вмісту в атмосферному повітрі населених пунктів частинок з розмірами менше 10 мкм та 2,5 мкм.

В даний час на багатьох підприємствах будівельної та інших галузей промисловості в системах знепилення викидів в атмосферу застосовують інерційні пиловловлювачі із зустрічними закрученими потоками (ЗЗП), які в порівнянні з циклонами мають ряд переваг. За даними деяких авторів [2–4, 8, 9, 13] підвищення ефективності пиловловлювачів ЗЗП може бути забезпечене при організації відсмоктування з бункера і при подачі на нижній та верхній впуск потоків з різним вмістом пилу. Тому для організації поділу газопилового потоку на потоки з більшою та меншою концентрацією пилових частинок може бути використана установка додаткових апаратів ЗЗП.

Викладене вище послужило підставою для вибору напряму досліджень зі зниження рівня пилового забруднення міського повітряного середовища на основі розробки та дослідження компоновальних схем систем очищення пилових викидів для виробництва газобетону та газобетонних будівельних виробів з використанням ЗЗП, з організацією відсмоктування з бункерної зони пиловловлювачів, та з встановленням додаткового апарату на рециркуляційному повітроводі.

Постановка завдання та його вирішення

Метою статті є забезпечення екологічної безпеки виробництва газобетону та газобетонних будівельних конструкцій через підвищення ефективності систем для захисту міського повітряного середовища від забруднення пиловими викидами.

Для досягнення поставленої мети у статті вирішувалися такі завдання:

- проведення експериментальних досліджень щодо оцінки впливу пилових викидів від джерел цеху з виробництва газобетону та газобетонних блоків на якість повітря нормованих територій, що включають: аналіз крупності пилу, що виділяється від технологічного обладнання при виробництві газобетонних блоків; аналіз фракційного складу пилу, що утворюється при виробництві газобетону та газобетонних блоків, що надходить у систему очищення пилових викидів та до міського атмосферного повітря; оцінку рівня забруднення міського повітряного середовища частинками PM_{10} та $PM_{2,5}$;

- розробка технічних рішень щодо зниження пилових викидів в атмосферу при виробництві газобетону та газобетонних будівельних конструкцій;

- розрахункова оцінка рівня зниження викидів пилу в атмосферу при використанні запропонованих рішень.

Матеріали та методи дослідження. Методологія та методи дослідження включали: аналітичне узагальнення відомих наукових та технічних результатів; планування фізичного експерименту; проведення лабораторних, натурних та дослідно-промислових досліджень; обробку експериментальних даних методами математичної статистики та кореляційного аналізу.

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій обґрунтована застосуванням класичних положень теоретичного аналізу, плануванням необхідного обсягу експериментів, підтверджена задовільняючою критерієм збіжністю отриманих результатів експериментальних досліджень, виконаних у лабораторних та промислових умовах, з результатами інших авторів.

Оцінки впливу пилових викидів у виробництві газобетону на якість повітря нормованих територій. При розробці заходів щодо зниження пилових викидів в атмосферне повітря було проведено аналіз крупності пилу, що виділяється від технологічного обладнання при виробництві газобетонних блоків. Результати наведено на рис. 1.

Отримані дані показали, що після системи обезпилювання викидів циклонами ЦН-11 в атмосферне повітря надходить, наприклад, пил вапна, частинки якого мають медіанний діаметр 5,5 мкм і діапазон зміни крупності від 1,5 до 15 мкм. Від поста дроблення в атмосферне повітря після очищення надходять частки пилу з медіанним діаметром 12 мкм та діапазоном зміни розмірів 1,8...18 мкм.

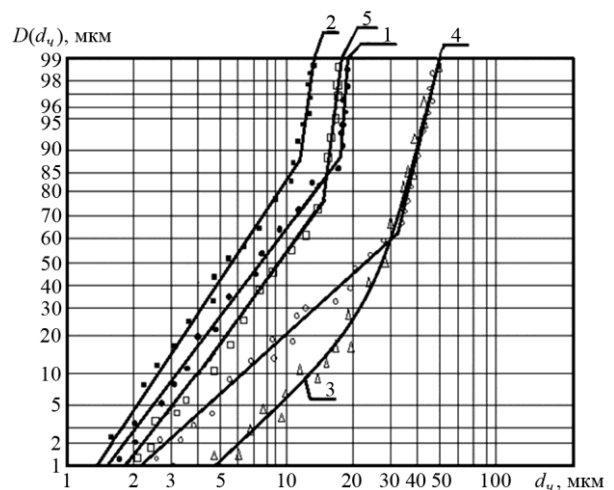


Рисунок 1 – Інтегральні функції фракційного розподілу маси частинок пилу, що надходить на систему аспірації від транспортера вихідних матеріалів:

- 1, 2 – при транспортуванні вапна до циклону і після циклону відповідно;
- 3, 4, 5 – при транспортуванні піску, гіпсового каменю, цементу відповідно

На рис. 2 наведено результати оцінки фракційного складу пилу, що міститься в атмосферному повітрі на території проммайданчика та на межі санітарно-захисної зони у теплий період року. Аналіз отриманих даних показує наявність частинок дрібнодисперсного пилу розміром менше 10 мкм.

Представлені результати свідчать, що у атмосферному повітрі біля проммайданчика частка частинок коливається для PM_{10} – від 12 % до 40 %, для $PM_{2,5}$ – від 0,3 % до 0,5 %. Медіанний діаметр часток становить 11-15 мкм. Розміри частинок змінюються не більше від 1,5 до 20 мкм. У атмосферному повітрі на межі санітарно-захисної зони на частку часток PM_{10} припадає 80 % маси пилу, на частку часток $PM_{2,5}$ – 0,5 %. Пилові частинки мають медіанний діаметр 8,2 мкм та межі зміни розміру від 2 мкм до 12 мкм. За результатами вимірювань загальної концентрації пилу в атмосферному повітрі та за даними про його дисперсний склад встановлено, що при виробництві будівельних блоків з газобетону внаслідок недостатнього ступеня знепилення викидів може відзначитися перевищення вмісту частинок PM_{10} , гранично допустима концентрація яких для повітря населених пунктів встановлена 0,3 мг/м³. Перевищення встановлених нормативів щодо концентрації частинок $PM_{2,5}$ за результатами дослідження не виявлено (табл. 1).

Схеми компонування систем знепилення викидів і розрахункова оцінка їх ефективності.

На рис. 3 показані розроблені варіанти компонування системи знепилення викидів. Запропоновані рішення (рис. 3) дозволяють:

– внаслідок організації відсмоктування з бункерної зони підвищити ефективність апарату другого ступеня, що призведе до підвищення ступеня очищення всієї системи загалом;

– внаслідок організації відсмоктування з бункерної зони знизити аеродинамічний опір другого пиловловлювача, що запобігатиме зростанню втрат тиску у всій системі, обумовлене установкою додаткового обладнання;

– внаслідок подачі на верхній і нижній входи пиловловлювачів першого та другого ступеня пилоповітряних потоків з різною концентрацією забезпечити підвищення їх ефективності, що призведе до зростання ефективності системи в цілому і, відповідно, до більшого зниження проскоку пилу в атмосферу.

Розрахункова оцінка ефективності запропонованих систем проведена на основі розв'язання систем балансових рівнянь повітряних та пилових потоків. Як приклад проведемо таку оцінку для системи, скомпонованої за першим варіантом. Розрахункова схема системи, скомпонованої за першим варіантом, представлена на рис. 4.

Відповідно до розрахункової схеми (рис. 4) система балансових рівнянь повітряних потоків має вигляд

$$\begin{cases} L_0 + L_4 = L_{\text{вх}3} + L^{\text{в}}_{\text{вх}2}; \\ L^{\text{в}}_{\text{вх}2} + L^{\text{в}}_{\text{вх}2} = L_{\text{вх}1} + L_{\text{відсм}2}; \\ L_{\text{вх}3} = L^{\text{в}}_{\text{вх}2} + L_{\text{відсм}3}; \\ L_4 = L_{\text{відсм}2} + L_{\text{відсм}3}. \end{cases} \quad (1)$$

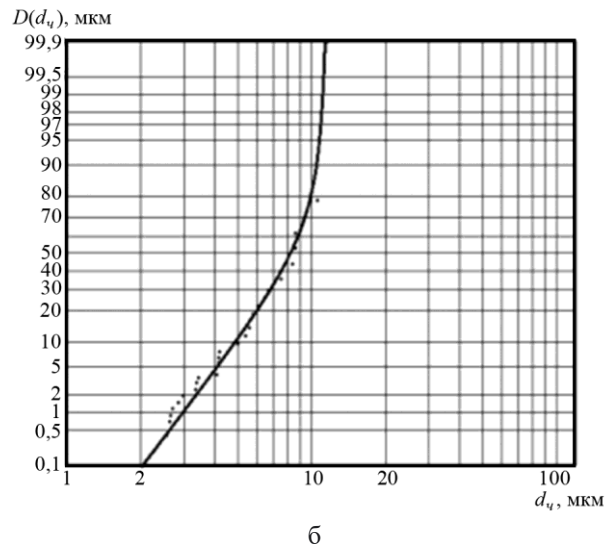
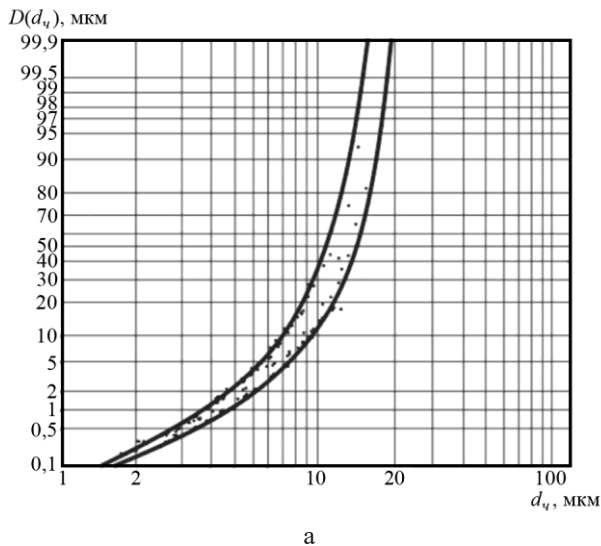


Рисунок 2 – Результати оцінки фракційного складу пилу в атмосферному повітрі: а – на території проммайданчика; б – на межі санітарно-захисної зони

Таблиця 1 – Концентрація частинок PM_{10} та $PM_{2,5}$ в атмосферному повітрі

Місце відбору проб	Загальна концентрація, мг/м ³	PM_{10}		$PM_{2,5}$	
		вміст, %	концентрація, мг/м ³	вміст, %	концентрація, мг/м ³
Територія проммайданчика	0,8	12...40	0,096...0,32	0,3...0,5	0,002...0,004
Межа санітарно-захисної зони	0,44	80	0,32	0,5	0,0022

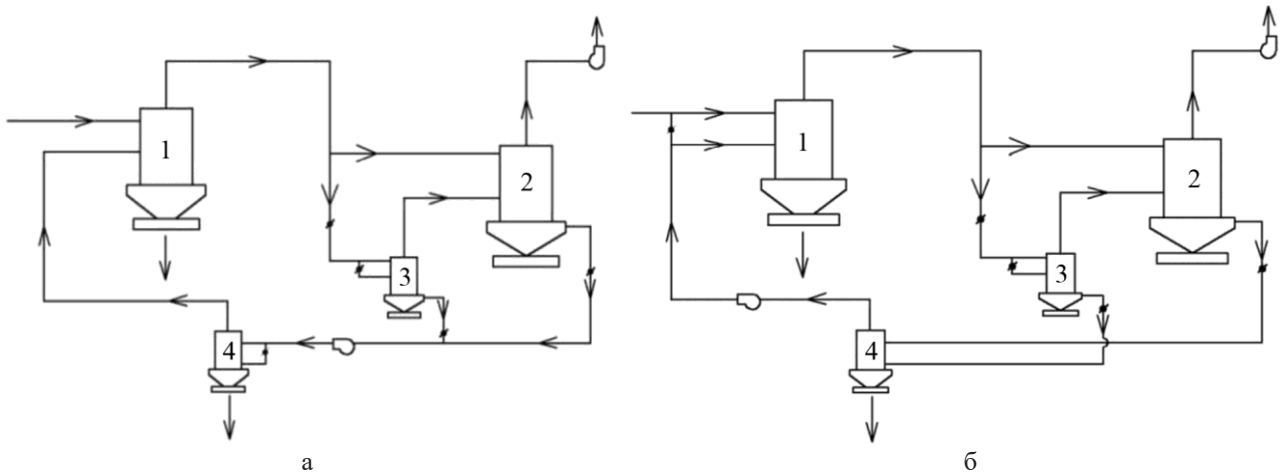


Рисунок 3 – Схеми компоновки систем знепилення викидів для газобетону:
 а – перший варіант; б – другий варіант;
 1, 2 – основні апарати ЗЗП; 3, 4 – додаткові апарати ЗЗП

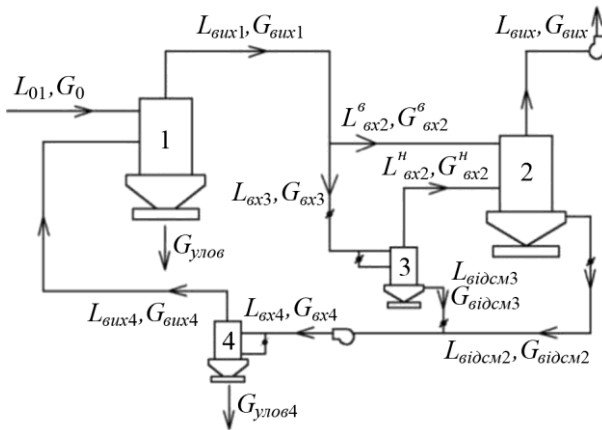


Рисунок 4 – Розрахункова схема системи, скомпонованої за першим варіантом

Система балансових рівнянь пилових потоків

$$\begin{cases}
 G_0 + G_4 = G_{вих1} + G_{улов1}; \\
 G_{вих1} = \varepsilon_1 (G_0 + G_4); \\
 G^{г}_{\alpha 2} = (L^g_2 / L_0 + L_4) G_{вих1}; \\
 (L_g / L_0 + L_4) G_{вих1} = G_{22} + G_{34}; \\
 G^{н}_{\alpha 2} = \varepsilon_3 G_{\alpha 3}; \\
 G_{вих} = \varepsilon_2 (G^{г}_{\alpha 2} + G^{н}_{\alpha 2}); \\
 G_{\alpha 4} = G_{вих4} + G_{улов4}; \\
 G_{вих4} = \varepsilon_4 G_{\alpha 4}.
 \end{cases} \quad (2)$$

При цьому

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= \varepsilon_1(L_0; L_4 / L_0; G_4 / G_0); & \varepsilon_2 &= \varepsilon_2(L^{н}_{\alpha 2} / L^g_{\alpha 2}; L_{відсм2}; G^{н}_{\alpha 2} / G^{г}_{\alpha 2}); \\
 \varepsilon_3 &= \varepsilon_3(L^{н}_{\alpha 3} / L^g_{\alpha 3}; L_{відсм3}); & \varepsilon_4 &= \varepsilon_4(L^{н}_{\alpha 4} / L^g_{\alpha 4}).
 \end{aligned}$$

Представимо функцію проскоку ε_i у вигляді

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i0} + a_1(\bar{L}_i - \bar{L}_{i0})^2 + a_2(\bar{L}_{i\text{виліжн}} - \bar{L}_{i\text{виліжн}0})^2 + a_3(\bar{L}_{i\text{відсм}} - \bar{L}_{i\text{відсм}0})^2 + a_4(c_i - c_{i0})^2 \quad (3)$$

і перепишемо константи та параметри у наступному вигляді

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i0} + \sum_{i=1}^4 a_i (x_i - x_{i0})^2, \quad (4)$$

де $i = 1, 2, 3, 4$ відповідно позначають загальну витрату, частку витрати, що надходить у нижній вхід, частку витрати, що надходить на відсмоктування, концентрацію.

Позначимо апарати ЗЗП у схемі індексами $j = 1 \div 4$. Нехай індекси, що характеризують для кожного апарата вхід чи вихід, мають вигляд:

$k = 1$ – верхній вхід; $k = 2$ – нижній вхід;
 $k = 3$ – відсмоктування; $k = 4$ – уловлювання;
 $k = 5$ – вихід.

Для універсальності пропонованого підходу розрахункової оцінки ефективності запропонованих технічних рішень систематизуємо всі рівняння за трьома групами (табл. 2).

Таблиця 2 – Групи рівнянь

I група	II група	III група
рівняння нерозривності	рівняння ефективності (проскоку)	рівняння, що характеризують особливості компоновки системи
$y_{j1} + y_{j2} = y_{j3} + y_{j4},$ $j = 1, 2, 3, 4$	$y_{j4} = \varepsilon_j (y_{j1} + y_{j2}),$ $j = 1, 2, 3, 4$	$y_{11} = 1;$ $y_{12} = y_{44};$ $y_{21} = k_{12} y_{14};$ $y_{31} + y_{32} = (1 - k_{12}) y_{14};$ $y_{32} = k_{33} (y_{31} + y_{32});$ $y_{22} = y_{34};$ $y_{44} = y_{23} + y_{33};$ $y_{42} = k_{44} (y_{23} + y_{33})$

Для вирішення системи методом послідовних наближень запишемо її у вигляді

$$SY = B \rightarrow Y = BS^{-1}$$

де Y – вектор характеристик пиловловлювача; B – вектор вихідних даних, що складається з вільних членів системи рівнянь.

Блок-схему розв'язання цього завдання наведено на рис. 5. Спочатку вибираємо значення $G_0, L_0, k_{12}, k_{33}, k_{44}$. Потім задаємо значення ε_j з розрахунку, що вхідна концентрація в апараті $c_{j1} = c_0$ і $c_{j2} = c_0$. Потім будуємо матрицю.

Знаходимо обернену матрицю S^{-1} . Обчислюємо вектор Y . З рівняння знаходимо ефективність усієї системи як

$$\frac{y_{24}}{y_{11}}$$

Для всіх $j = 1 \div 4$ розраховуємо значення

$$\varepsilon_j = \frac{y_{j4}}{y_{j1} + y_{j2}}$$

Якщо для всіх j виконується умова $|\varepsilon_{jнов} - \varepsilon_{jстар}| < 0,001$, то рішення знайдено і ефективність системи ε визначена. Якщо умова не виконується, то обчислюємо нові значення y_i , переходимо вгору і знову проводимо обчислення, доки зазначена умова не буде виконуватися.

Таким чином, отримане значення ε системи дозволяє при заданих співвідношеннях витрат всередині системи розрахувати ефективність всієї системи. При цьому величина ε_1 істотно залежить від витрат L_0 , співвідношення витрат L_4/L_0 , співвідношення концентрацій c_4/c_0 , розміру d_{50} на вході в перший пиловловлювач. Аналогічно ε_j залежить від параметрів на вході в цей пиловловлювач і величини відсмоктування з 3 і 4 пиловловлювачів.



Рисунок 5 – Блок-схема розв'язання задачі

Експериментальна оцінка ефективності запропонованих рішень щодо зниження пилових викидів у міське повітряне середовище під час виробництва газобетону. Експериментальні дослідження проводилися у два етапи. На етапі попереднього експерименту визначалося співвідношення діаметрів основних та додаткових пиловловлювачів \bar{D}

$$\bar{D} = D_3 / D_1 = D_3 / D_2 = D_4 / D_1 = D_4 / D_2,$$

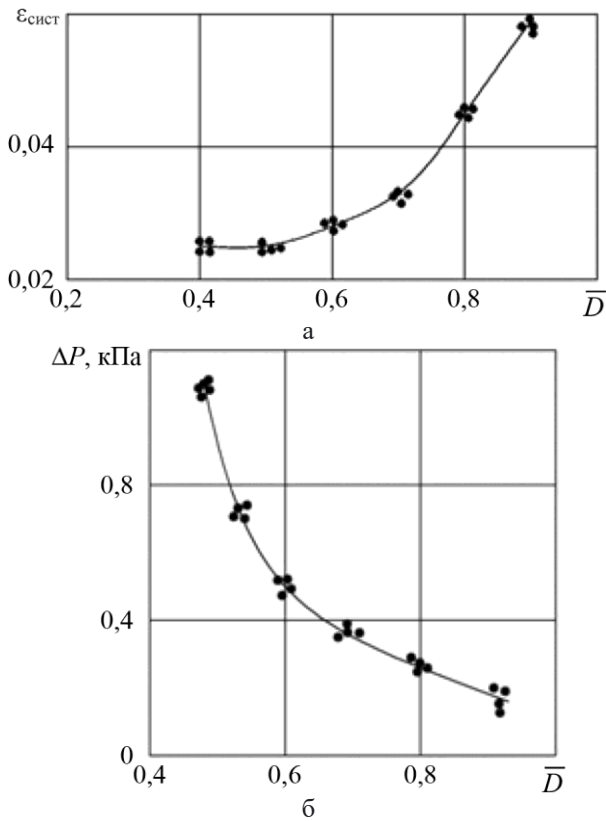


Рисунок 6 – Результати попереднього експерименту:
а – залежність величини проскоку пилу від співвідношення діаметрів; б – залежність витрат тиску в додатковому пиловловлювачі від співвідношення діаметрів

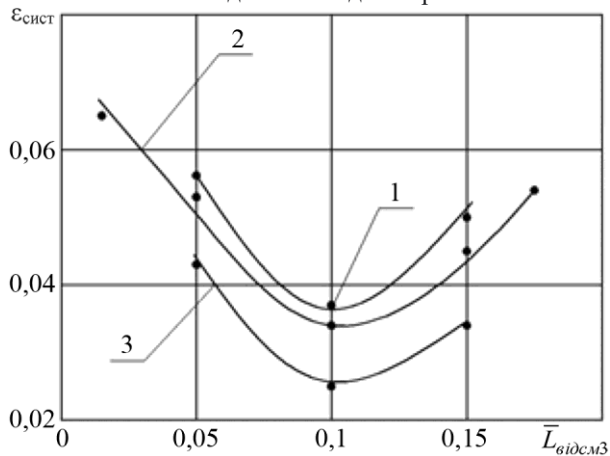


Рисунок 7 – Залежність величини проскоку від витрат, що відсмоктуються з бункера додаткового пиловловлювача при $\bar{L}_{\text{відсм}2} = 0,20$:
1 – при $\bar{L}_0 = 5,4$; 2 – при $\bar{L}_0 = 7,2$; 3 – при $\bar{L}_0 = 9,0$.
• експериментальні значення;
— розрахункові дані за виразом (5)

$$\epsilon_{\text{сист}} = 0,0266 + 8,04 (\bar{L}_{\text{відсм}2} - 0,186)^2 + 5,04 (\bar{L}_{\text{відсм}3} - 0,118)^2 - 0,0008 (\bar{L}_0 - 4,6)^2 + 0,0123 \bar{L}_{\text{відсм}3} \bar{L}_0, \quad (5)$$

при $9,4 \leq \bar{L}_0 \leq 5,4$; $0,15 \leq \bar{L}_{\text{відсм}2} \leq 0,25$;
 $0,05 \leq \bar{L}_{\text{відсм}3} \leq 0,15$. Для оцінки енерговитрат на реалізацію процесів знепилення в аналізованій установці був визначений коефіцієнт аеродина-

мичного опору $\zeta_{\text{сист}}$ як відношення сумарних витрат тиску в пиловловлювачах першого і другого ступеня до динамічного тиску, розрахованого за середньою швидкістю потоку в основному пиловловлювачі. Дані показані на рис. 8.

при якому забезпечується найменший проскок пилу. Отримані результати (рис. 6) показали, що найменша величина проскоку $\epsilon_{\text{сист}}$ забезпечується при значеннях $\bar{D} = 0,4 \dots 0,5$ (рис. 6, а). При подальшому збільшенні діаметра додаткового пиловловлювача швидкість пилоповітряного потоку в ньому знижується, що призводить до зростання $\epsilon_{\text{сист}}$. Однак при $\bar{D} < 0,5$ різко зростає аеродинамічний опір додаткового апарату (рис. 6, б), що приводить до підвищення витрат на проведення процесів пилоочищення. Виходячи з цього можна вважати, що найбільш раціональним є співвідношення $\bar{D} = 0,5$.

На етапі основного експерименту було реалізовано центральний композиційний рототабельний план за наступними факторами: витрата повітря, що надходить у систему на очищення, віднесена до $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ (\bar{L}_0); частка (від того що надходить на очищення в систему) витрат, що відсмоктується з бункера апарату 2 ($\bar{L}_{\text{відсм}2} = L_{\text{відсм}2} / L_0$); частка (від того що надходить на очищення в систему) витрат, що відсмоктується з бункера апарату 3 ($\bar{L}_{\text{відсм}3} = L_{\text{відсм}3} / L_0$). При обробці експериментальних даних за критерієм Стьюдента перевірялася значимість коефіцієнтів рівняння регресії, та його адекватність перевірялася за критерієм Фішера.

На рис. 7 представлені результати експериментальної оцінки величини проскоку пилу в атмосферу залежно від визначальних факторів для системи, скомпонованої за першим варіантом (рис. 3, а).

Результати експериментальних досліджень показали, що зі збільшенням витрати пилоповітряної суміші знижується проскок пилу в атмосферне повітря, що обумовлено підвищенням швидкості потоку в пиловловлювачах. Отримані дані також свідчать про те, що найменший проскок пилу забезпечується за зміни частки витрати, що відсмоктується з бункера пиловловлювача другого ступеня, в межах $0,17 \leq \bar{L}_{\text{відсм}2} \leq 0,22$ та зміни частки витрати повітря, що відсмоктується з бункера додаткового апарату 3 в межах $0,08 \leq \bar{L}_{\text{відсм}3} \leq 0,12$, оскільки при таких поєднаннях верхніх меж $\bar{L}_{\text{відсм}2}$ з нижніми межами $\bar{L}_{\text{відсм}3}$ і навпаки забезпечується таке співвідношення витрат, що подаються на нижній і верхній входи апарату першого ступеня, при якому досягається найбільша ефективність пиловловлювачів ЗЗП.

Рівняння регресії має вигляд

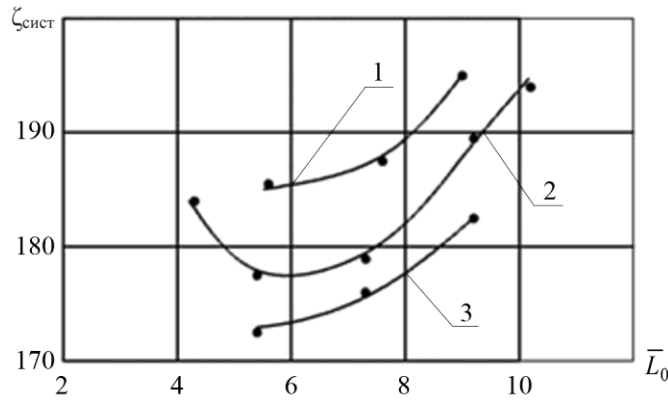


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта аеродинамічного опору $\zeta_{\text{сист}}$ від витрат пилоповітряної суміші, що подається на очищення до системи знепилення при:

- 1 – при $\bar{L}_{\text{відсм}2} = 0,15$; 2 – при $\bar{L}_{\text{відсм}2} = 0,20$; 3 – при $\bar{L}_{\text{відсм}2} = 0,25$.
- експериментальні значення; — розрахункові дані за виразом (6)

При цьому

$$\zeta_{\text{сист}} = 174,3 + 0,904 (\bar{L}_0 - 4,9)^2 + 388 (\bar{L}_{\text{відсм}2} - 0,355)^2 \quad (6)$$

при $5,4 \leq \bar{L}_0 \leq 9$; $0,15 \leq \bar{L}_{\text{відсм}2} \leq 0,25$; $0,05 \leq \bar{L}_{\text{відсм}3} \leq 0,15$.

Аналіз отриманих даних показує, що найменший аеродинамічний опір система знепилення викидів, скомпонована за першим варіантом, має при $\bar{L}_0 = 0,54$ і $\bar{L}_{\text{відсм}2} = 0,25$.

Таким чином, найменші величини проскоку пилу досягаються при зміні частки витрати, що відсмоктується з бункера пиловловлювача другого ступеня, в межах $0,17 \leq \bar{L}_{\text{відсм}2} \leq 0,22$ і $7,2 \leq \bar{L}_0 \leq 9,4$. З іншого боку, найменші енергетичні витрати на проведення процесу знепилення забезпечуються при $0,20 \leq \bar{L}_{\text{відсм}2} \leq 0,25$ і при $5,4 \leq \bar{L}_0 \leq 7,2$. З урахуванням цього, найбільш раціональними доцільно прийняти такі режими роботи системи для зниження запиленості викидів, скомпонованої за першим із запропонованих варіантів: зміна частки витрати, що відсмоктується з бункера пиловловлювача другого ступеня, в межах $0,17 \leq \bar{L}_{\text{відсм}2} \leq 0,22$; зміна частки витрат,

що відсмоктуються з бункера додаткового апарату 3 у межах $0,08 \leq \bar{L}_{\text{відсм}3} \leq 0,12$; зміна витрати пилоповітряної суміші, що подається в систему, в межах $5,4 \leq \bar{L}_0 \leq 7,2$.

Отримані результати також свідчать, що система знепилювання, скомпонована за другим варіантом (рис. 3, б), у порівнянні з першим варіантом, характеризується значними енерговитратами на проведення процесів очищення пилових викидів. З огляду на це, а також з урахуванням того, що в даному випадку величина проскоку пилу в атмосферу вище, до практичного використання слід рекомендувати систему очищення викидів, скомпоновану за першим варіантом.

Система знепилювання викидів для виробництва газобетону та газобетонних блоків пройшла дослідно-промислові випробування на промисловій базі «Завод будівельних матеріалів № 1» м. Нова Каховка (січень, 2022 р.). Результати випробувань представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати зіставлення показників традиційної та запропонованої систем пилоочищення

Параметр	Тип системи	
	традиційна	запропонована
Концентрація пилу в потоці на виході з системи, мг/м ³	109	12,3
Вміст частинок РМ ₁₀ у викиді, %	40	24
Вміст частинок РМ _{2,5} у викиді, %	0,5	0,4
Концентрація частинок РМ ₁₀ у потоці на виході із системи, мг/м ³	43,6	1,7
Концентрація частинок РМ _{2,5} у потоці на виході із системи, мг/м ³	0,55	0,2
Проскок системи $\varepsilon_{\text{сист}}$, %	11,6	5,7
Маса пилу, що викидається в атмосферу, г/год	796	89,8
Втрати тиску в системі, Па	1960	1740

Висновки

За результатами виконаних досліджень можна зробити такі основні висновки.

1. Встановлено, що при використанні традиційних систем очищення пилових викидів циклонами в атмосферне повітря викидається пил, до 100 % маси якого припадає на частинки з розмірами до 20 мкм. При цьому їхній медіанний діаметр дорівнює 12 мкм, частка частинок з розмірами менше 10 мкм (PM_{10}) становить 40 %, частка частинок з розмірами менше 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) – 0,5%. Значення частки частинок в атмосферному повітрі біля промайданчика влітку коливаються: для PM_{10} – від 12 % до 40 %; для $PM_{2,5}$ – від 0,3 % до 0,5 %. На межі санітарно-захисної зони ці значення становлять 80 % та 0,5 % відповідно.

2. На основі даних, отриманих у натурних умовах, зазначено перевищення вмісту частинок PM_{10} в атмосферному повітрі на території промайданчика та на межі санітарно-захисної зони над гранично допустимою концентрацією, встановленою для таких частинок для повітряного середовища населених пунктів.

3. Для зниження надходження пилу в атмосферу при виробництві газобетону та будівельних виробів на його основі запропоновано два варіанти компонування систем знепилювання викидів з двома послідовно встановленими пиловловлювачами ЗЗП, двома додатковими апаратами менших розмірів, з організацією відсмоктування з бункера основного пиловловлювача другого ступеня та із бункера одного з додаткових апаратів. Перший варіант компонування передбачає об'єднану подачу

рециркуляційного потоку в другий з додаткових апаратів. Другий варіант компонування системи знепилення передбачає роздільну подачу рециркуляційних потоків у другий з додаткових апаратів.

4. Розроблено методичні основи розрахункової оцінки ступеня зниження пилових викидів у міське повітряне середовище при використанні в промисловості будівельних матеріалів установок пилоочищення з різними схемами компонування, що включають: систему розрахункових рівнянь; систематизацію розрахункових рівнянь за такими групами – балансові рівняння; рівняння проскоку пилу (рівняння ефективності); рівняння, що характеризують особливості схеми компонування системи знепилення викидів; блок-схему розрахунку ступеня зниження пилових надходжень в атмосферне повітря.

5. За результатами досліджень встановлені залежності, що характеризують ступінь зниження викидів пилу в атмосферу, а також виявлено діапазони зміни режимно-конструктивних параметрів запропонованих систем пилоочищення, при яких забезпечується найменше пилонадходження в навколишнє середовище та найменші енерговитрати на проведення процесів обезпилювання викидів під час виробництва газобетону та будівельних конструкцій на його основі.

6. Використання запропонованої системи пилоочищення показало, що вміст часток PM_{10} у потоці, що викидається в атмосферне повітря скоротився на 40 %, вміст частинок $PM_{2,5}$ – на 20 %. При цьому викид пилу в атмосферу скоротився у 8,9 разів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дадак Ю. Р., Ляшеник А. В. Чинники комплексного вирішення питання екологічної ефективності процесів знепилення на деревообробних підприємствах. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. № 26.7. С. 277–284.
2. Батлук В. А., Парняк Н. М., Гречка І. П. Вирішення питання очистки повітря від цементного пилу. *Теорія і практика будівництва*. 2013. №11. С. 3–8.
3. Климець В. В., Козира І. М. Створення принципово нових конструкцій апаратів для вловлення пилу, що налипає. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф., Харків, 29–31 трав. 2013. Харків, 2013. С. 324.
4. Мадані М. М. Зниження запиленості повітря робочої зони на деревообробних підприємствах. *Техногенно-екологічна безпека*. 2022. № 11 (1/2022). С. 68–73. DOI: 10.52363/2522-1892.2022.1.10.
5. Математично-статистичне дослідження впливу дрібнодисперсних твердих забруднюючих речовин на здоров'я людини / Козій І. С. та ін. *Техногенно-екологічна безпека*. 2021. № 10 (2/2021). С. 23–27.
6. Буров О. О., Буров О. І., Винограденко Л. В. Знепилювання газових викидів сушильної установки. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2014. № 74. С. 140–143.
7. Карамушко А. В., Буров О. О. Підвищення екологічної безпеки паливного господарства ТЕС за рахунок використання закритої системи аспірації. *Актуальні проблеми енергетики та екології* : матеріали XII Всеукр. наук.-техн. конф., м. Одеса, 5–7 жовт. 2016. Одеса, 2016. С. 176–177.
8. Гаджиев Е. Н. Підвищення екологічної безпеки при виробництві теплоізоляційних матеріалів шляхом зниження викидів забруднюючих речовин з використанням дисперсійного аналізу пилу. *Науковий вісник будівництва*. 2018. Т. 92, №2. С.305–312. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-92-2-305312.
9. Козій І. С., Гурець Л. Л. Дослідження ефективності пилоочищення в апараті з провальними тарілками великих отворів. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*. 2010. №6(65). С.160-162.
10. Батлук В. А., Парняк Н. М. Розроблення заходів щодо техногенного навантаження на довкілля пилових викидів цементного виробництва. *Промислова гідраліка і пневматика*. 2014. № 1. С. 3-6.
11. Шмандій В. М., Климець В. В., Бахарев В. С. Зменшення рівня екологічної небезпеки від пилових викидів зернових елеваторів. *Екологічна безпека*. 2014. № 1. С. 103-108.
12. Вплив бункера на ефективність уловлення пилу / Батлук В. А., Батлук В. В., Мота Я. В., Шибанов С. В. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2008. № 609. С. 204-207.
13. Буров О. О., Буров О. І., Карамушко А. В. Вільний рух частки у криволінійному каналі. *Аграрний вісник Причорномор'я. Технічні науки*. 2012. №63. С. 140-143.

Madani M.**PROTECTION OF THE ATMOSPHERE OF URBANIZED AREAS FROM DUST EMISSIONS DURING THE MANUFACTURE OF AERATED CONCRETE STRUCTURES**

The article provides a solution to the urgent task of ensuring the protection of the natural environment and vital human interests from the negative effects of dust emissions generated during the production of aerated concrete and construction products based on it. It has been established that when traditional dust emission cleaning systems with cyclones is used, dust is emitted into the atmospheric air, and up to 100 % of the mass of dust is represented with particles of up to 20 microns in size. At the same time their median diameter is 12 microns, the percentage of particles with sizes less than 10 microns (PM₁₀) is 40 %, the percentage of particles with sizes less than 2,5 microns (PM_{2,5}) is 0.5 %. The percentage of particles in the atmospheric air near the industrial site in the summer varies: for PM₁₀ – from 12 % to 40 %; for PM_{2,5} – from 0.3 % to 0.5 %. At the border of the sanitary protection zone these values are 80 % and 0.5 %, respectively.

In order to reduce dust entering the atmosphere during the production of aerated concrete and construction products based on it, two options for the layout of emission dust removal systems with two consecutively installed dust collectors with counter-rotating flows, two additional devices of smaller sizes, with the organization of suction from the hopper of the main dust collector of the second stage are proposed and from the bunker of one of the additional devices. The use of the proposed dust cleaning system showed that the content of PM₁₀ particles in the stream, emitted into the atmosphere, was decreased by 40 %, the content of PM_{2,5} particles – by 20 %. At the same time, the emission of dust into the atmosphere was decreased by 8.9 times.

Dependencies characterizing the degree of reduction of dust emissions into the atmosphere were established, as well as the ranges of changes in the regime and design parameters of the proposed dust cleaning systems, which ensure the least amount of dust entering the environment and the least energy costs for carrying out dust removal processes during the production of aerated concrete and building structures based on it.

Key words: removal of dust emissions, technologies of atmosphere protection, techno-ecology, urbanized areas.

REFERENCES

1. Dadak, Yu. R., Liashenyk, A. V. (2016). Chynnyky kompleksnoho vyrishennia pytannia ekolohichnoi efektyvnosti protsesiv znepylennia na derevoobrobnykh pidpryemstvakh [Factors of a comprehensive solution to the issue of environmental efficiency of dust removal processes at woodworking enterprises]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 26.7, 277–284. [in Ukrainian].
2. Batluk, V. A., Paraniak, N. M., Hrechka, I. P. (2013). Vyrishennia pytannia ochystky povitria vid tsementnoho pyly [Solving the issue of air purification from cement dust]. *Teoriia i praktyka budivnytstva*, 11, 3–8. [in Ukrainian].
3. Klymets, V. V., Kozyra, I. M. (2013). Stvorennia pryntsyypovo novykh konstruksii aparativ dlia vlovlennia pyly, shcho nalypaie [Creation of fundamentally new designs of devices for catching sticking dust], *Informatsiini tekhnologii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia, tezy dopovidei XXI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii* [Information technologies: science, engineering, technology, education, health, Abstracts of Papers of the 21st international scientific and practical conference]. Kharkiv, 324. [in Ukrainian].
4. Madani, M. M. (2022). Znyzhennia zapylenosti povitria robochoi zony na derevoobrobnykh pidpryemstvakh [Reduction of air dust of the work zone at woodworking enterprises]. *Tekhnohemno-ekolohichna bezpeka*, 11 (1/2022), 68–73. DOI: 10.52363/2522-1892.2022.1.10. [in Ukrainian].
5. Kozii, I. S., Roi, I. O., Yakhnenko, O. M., Ponomarenko, R. V., Shcherbak, S. S. (2021). Matematychno-statystychno doslidzhennia vplyvu dribnodispersnykh tverdykh zabrudniuiuchykh rehovyn na zdorovia liudyny [Mathematical and statistical study of the impact of finely dispersed solid pollutants on human health]. *Tekhnohemno-ekolohichna bezpeka*, 10 (2/2021), 23–27. [in Ukrainian].
6. Burov, O. O., Burov, O. I., Vynohradenko, L. V. (2014). Znepylivannia hazovykh vykydiv sushlynoi ustanovky [Dedusting of gas emissions from the drying plant]. *Ahrarnyi visnyk Prychornomoria*, 74, 140–143. [in Ukrainian].
7. Karamushko, A. V., Burov, O. O. (2016). Pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky palyvnoho hospodarstvo TES za rakhunok vykorystannia zakrytoi systemy aspiratsii. [Increasing the environmental safety of the fuel economy of TES due to the use of a closed aspiration system], *Aktualni problemy enerhetyky ta ekolohii, materialy XII Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* [Actual problems of energy and ecology, Proceedings of the 12th All-Ukrainian scientific and technical conference]. Odesa, 176–177. [in Ukrainian].
8. Hadzhyiev, E. N. (2018). Pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky pry vyrobnytstvi teploizoliatsiinykh materialiv shliakhom znyzhennia vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn z vykorystanniam dyspersiinoho analizu pyly [Increasing environmental safety in the production of heat-insulating materials by reducing pollutant emissions using dust dispersion analysis]. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 92(2), 305–312. DOI: 10.29295/2311-7257-2018-92-2-305312. [in Ukrainian].
9. Kozii, I. S., Hurets, L. L. (2010). Doslidzhennia efektyvnosti pyloochyshchennia v aparati z provalnymy tarilkamy velykykh otvoriv [Study of the effectiveness of dust cleaning in the apparatus with large-hole drop plates]. *Visnyk KDPU im. M. Ostrohradskoho*, 6(65), 160–162. [in Ukrainian].
10. Baltuk, V. A., Parniak, N. M. (2014). Rozroblennia zakhodiv schodo tekhnogennoho navantazhennia na dovkillia pylovykh vykydiv tsementnoho vyrobnytstva [Development of measures regarding technogenic burden on the environment of dust emissions from cement production]. *Promyslova hidravlika i pnevmatyka*, 1, 3–6. [in Ukrainian].
11. Shmandii, V. M., Klymets, V. V., Bakhariev, V. S. (2014). Zmenshennia rivnia ekolohichnoi nebezpeky vid pylovykh vykydiv zernovykh elevatoriv [Reducing the level of environmental hazards from dust emissions from grain elevators]. *Ekolohichna bezpeka*, 1, 103–108. [in Ukrainian].
12. Batluk, V. A., Batluk, V. V., Mota, Ya. V., Shybanov, S. V. (2008). Vplyv bunkera na efektyvnist ulovlennia pyly [The influence of the hopper on the efficiency of dust capture]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*, 609, 204–207. [in Ukrainian].
13. Burov, O. O., Burov, O. I., Karamushko, A. V. (2012). Vilnyi rukh chastky u kryvoliniinomu kanali [Free motion of a particle in a curved channel]. *Ahrarnyi visnyk Prychornomoria. Tekhnichni nauky*, 63, 140–143. [in Ukrainian].