**Серпутко Р.С**здобувач освітнього ступеня
доктора філософії**Національний
університет «Львівська
політехніка»****Serputko R.**

recipient of the PhD degree

**Lviv Polytechnic National
University****УДК 631.22.014:636.084.74****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-4-5****ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ
ДОСЛІДЖЕННЯ
ПРОДУКТИВНОСТІ
ГРАВІТАЦІЙНОГО ДОЗАТОРА
СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

У статті представлено результати експериментальних досліджень продуктивності гравітаційного дозатора сипких матеріалів залежно від його конструктивно-геометричних параметрів. Основною метою роботи було встановлення кількісної залежності між радіусом кривизни робочої поверхні та кутом його нахилу відносно вертикалі, а також визначення оптимальних параметрів, які забезпечують максимальну продуктивність подачі сипкого матеріалу. Для реалізації поставленої мети застосовано планований двофакторний експеримент з трьома рівнями варіювання кожного параметра, що дозволило отримати достовірні результати з високою повторюваністю.

Експериментальні дослідження проводили на спеціально розробленій лабораторній установці, що дає змогу змінювати кут нахилу робочої поверхні та радіус його кривизни. Вимірювання виконували для дев'яти комбінацій факторів з трьома повторними вимірюваннями для кожної точки плану. За результатами обчислював продуктивність дозатора та виконував статистичну обробку. Показник варіації не перевищував 5 %, що підтверджує стабільність потоку та достовірність отриманих результатів.

Побудовано рівняння регресії другого порядку, яке описує залежність продуктивності від двох факторів, з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,98$, що свідчить про високу адекватність моделі. Встановлено, що збільшення кута нахилу робочої поверхні від -10° до $+10^\circ$ забезпечує зростання продуктивності на 40–45 %, а збільшення радіуса кривизни від 120 до 160 мм - на 25 %. Максимальна продуктивність $Q=7,5$ кг/хв в досягається при $\rho=160$ мм та $\alpha=10^\circ$. Оптимальна зона роботи дозатора знаходиться в межах $\rho=140-150$ мм та $\alpha=8-12^\circ$.

Результати дослідження підтверджено графічною інтерпретацією: лінійними залежностями, контурними діаграмами та гістограмами. Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманої математичної моделі та експериментальних закономірностей для проєктування та оптимізації гравітаційних дозаторів у сільськогосподарському, харчовому та будівельному виробництві, а також для розроблення систем автоматизованого керування процесами дозування.

Ключові слова: гравітаційний дозатор, сипкі матеріали, продуктивність, кут нахилу, радіус кривизни, експеримент, моделювання, технічна ефективність.



Вступ. Сипкі матеріали становлять основу широкого спектра технологічних процесів у харчовій, аграрній, хімічній та будівельній промисловості. Дозування таких матеріалів є ключовою операцією, яка визначає якість кінцевого продукту, точність рецептури та стабільність роботи всього виробничого процесу. На відміну від рідких або газоподібних середовищ, сипкі матеріали характеризуються складною поведінкою потоку — залежною від гранулометричного складу, вологості, кута природного укосу та щільності. Ці особливості ускладнюють прогнозування витрати матеріалу та забезпечення рівномірності подачі.

Серед відомих типів дозувального обладнання важливе місце посідають гравітаційні дозатори, в яких переміщення матеріалу відбувається під дією сили тяжіння. Такі системи мають низьку перевагу — просту конструкцію, низьку енергоємність, високу надійність, відсутність рухомих елементів, що зменшує експлуатаційні витрати. Завдяки цим характеристикам гравітаційні дозатори знаходять застосування у багатьох технологічних лініях безперервної дії.

Проте, незважаючи на конструктивну простоту, точність і стабільність дозування у гравітаційних системах значною мірою залежать від:

- геометричних параметрів дозатора (кут нахилу, довжина і форма жолоба, ширина витратного каналу);
- фізико-механічних властивостей матеріалу (насипна густина, сипкість, фракційний склад, вологість);
- режимів роботи (товщина шару, швидкість витікання, стабільність потоку).

Класичні методи розрахунку продуктивності ґрунтуються на спрощених припущеннях про лінійний рух частинок по похилій поверхні. Проте реальні потоки сипких матеріалів мають складну структуру, включаючи флуктуації густини та швидкості, утворення злипань, сегрегацію частинок та пульсаційні явища. Це призводить до розбіжностей між розрахунковими та реальними витратами, що особливо критично в системах з високими вимогами до точності дозування.

Проблематика стабільного дозування стає особливо актуальною для автоматизованих виробництв, де процес повинен мати високу відтворюваність, мінімальні похибки та можливість адаптації під різні типи матеріалів. У світовій практиці зростає інтерес до математичного моделювання та планованих експериментів для оптимізації дозувального обладнання. Це дозволяє не лише підвищити точність, але й мінімізувати витрати часу на підбір робочих параметрів.

Таким чином, постає практична та наукова задача — розробити узагальнену методiku розрахунку продуктивності гравітаційного

дозатора, підтверджену експериментальними дослідженнями, яка враховує реальні фактори, що впливають на масову витрату сипкого матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поведінка сипких матеріалів у гравітаційних потоках вивчається вже понад пів століття. Класична школа механіки гранульованих середовищ, представлена працями Неддермана та Шульце [1, 2], заклала основу розуміння напружено-деформованого стану гранулярних систем, критеріїв плинності, умов ковзання та зсуву шару. Ці моделі дозволяють обґрунтовано визначати геометрію дозаторів, жолобів і бункерів з урахуванням властивостей матеріалу.

Фундаментальні експериментальні дослідження Пулікена [3] показали, що швидкість щільного потоку на похилій площині тісно пов'язана з кутом нахилу та кривизною поверхні ковзання. Ці закономірності лягли в основу практичних аналітичних залежностей, які широко використовуються для розрахунку продуктивності гравітаційних дозаторів.

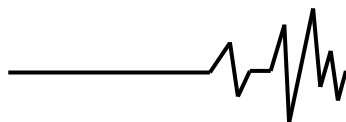
У подальшому значного розвитку набули в'язко-пластичні моделі $\mu(I)$ -реології, систематизовані у роботах Фортера та Пулікена [4] і розвинуті у конститутивному рівнянні Йопа–Фортера–Пулікена [5]. Вони забезпечують фізично обґрунтований зв'язок між напруженням зсуву та швидкістю деформації в щільному режимі потоку, дозволяючи точніше оцінювати вплив параметрів на продуктивність дозаторів.

Закон Беверлоо [6], хоча й розроблений для оцінки витрати через отвори бункерів, широко застосовується для інженерної оцінки межових режимів витікання та орієнтовного визначення граничних витратних характеристик. Для жолобів цей закон використовується як орієнтир для порівняння теоретичних розрахунків із фактичними експериментальними даними.

Для визначення оптимальних режимів роботи дозаторів у літературі [7–10] активно застосовується метод планованого експерименту (Design of Experiments) і Response Surface Methodology (RSM), розроблені Боксом і Вілсоном. Ці підходи дозволяють статистично обґрунтовано визначати лінійні, квадратичні та перехресні ефекти технологічних параметрів, таких як кут нахилу жолоба та кривизна поверхні.

У практиці експериментальних досліджень точність визначення продуктивності значною мірою залежить від метрологічного забезпечення. Метод динамічного зважування, розроблений Агілерою Меню [11] та описаний у калібрувальних настановах NIST [12], забезпечує високу точність вимірювань витрати сипких матеріалів у реальному часі, враховуючи пульсації потоку та інерційність вимірювальної системи.

Отже, аналіз літератури свідчить про те, що ефективне моделювання та експериментальна перевірка продуктивності гравітаційних дозаторів



потребують поєднання: класичних аналітичних моделей гранульованих потоків; статистичних методів плануваного експерименту; сучасних засобів вимірювання витрати. Таке поєднання забезпечує високу точність розрахунків та надійність практичних рекомендацій для інженерного проектування.

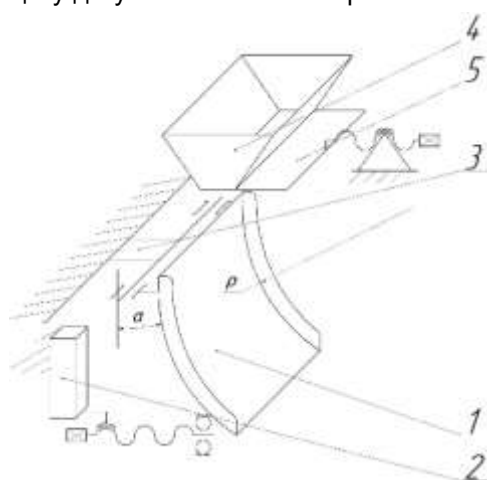
Формулювання мети дослідження.

Експериментально дослідити та розробити кореляційну залежність продуктивності гравітаційного дозатора сипких матеріалів, яка враховує конструктивні параметри дозатора та фізико-механічні характеристики матеріалу.

Викладення основного матеріалу. Для дослідження процесу дозування сипких матеріалів

було створено експериментальну установку, рис. 1. Вона моделює реальні умови гравітаційного переміщення потоку по похилій площині.

Гравітаційний дозатор складається з дозуючого робочого органу 1, площинна поверхня якого виконана у вигляді кривизни радіусом ρ . Площина регулюється по відношенню до вертикалі на кут $\pm\alpha$. Тензометричний давач 2 вимірює масу потоку матеріалу, який рухається по площині дозатора. Бункер 4 для сипкого матеріалу кріпиться на жорсткій рамі 3. Шибер 5 регулює потік матеріалу з бункера 4 на дозуючий робочий орган.



а)



б)

Рис. 1. Гравітаційний дозатор сипких матеріалів: а- схема гравітаційного дозатора; б – загальний вигляд

Експеримент дослідження здійснював наступним чином. Подача сипкого матеріалу здійснюється з бункера 4 на робочий жолоб 1, який нахилиється під кутом α до вертикалі. Потік матеріалу рухається по поверхні з радіусом кривизни ρ , викликаючи навантаження на тензометричний давач, через який фіксується маса та час проходження матеріалу.

Відповідно основними фактори які впливають на продуктивність дозування є радіус кривизна ρ , робочого органу, та кут нахилу робочого органу до вертикалі α .

Для дослідження впливу параметрів ρ та α на продуктивність застосовано двофакторний планований експеримент, який дозволяє визначити не лише окремих, а й комбінований вплив факторів.

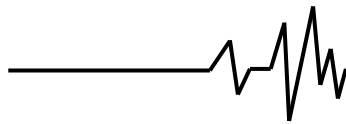
Фактори експерименту: $x_1 = \rho$ - радіус кривизни жолоба, мм; $x_2 = \alpha$ - кут нахилу жолоба до вертикалі, градуси. В якості критерія відгуку прийнято продуктивність дозування Q .

Відповідно матриця факторного планованого експерименту табл. 1.

Таблиця 1

Матриця плану експерименту

№ досліджу	Варіювання факторів		Критерії відгуку
	x_1	x_2	
1	+1	+1	y_1
2	-1	-1	y_2
3	+1	-1	y_3
4	-1	+1	y_4
5	+1	0	y_5
6	-1	0	y_6
7	0	+1	y_7
8	0	-1	y_8
9	0	0	y_9



На основі теоретичних досліджень, вибрано рівні варіювання факторів, та їх кодові значення, приведено в табл. 2.

Таблиця 2

Інтервали і рівні варіювання факторів

Фактор	Позначення	Розмірність	Рівні факторів			Інтервал варіювання
			верхній	нульовий	нижній	
			Кодові значення			
			+1	0	-1	
Радіус кривизна робочого органна, ρ	x_1	мм	120	140	160	20
Кут нахилу робочого органу до вертикалі, α	x_2	град.	-10	0	10	1

Дослідження відбувалося наступним чином фіксували масу матеріалу, що пройшла через дозатор за певний проміжок часу. За отриманими даними розраховували продуктивність дозування за формулою:

$$Q = \frac{m}{t}, \quad (1)$$

де Q - продуктивність, кг/хв; m - маса матеріалу, кг; t - час проходження, хв.

Дослідження проводив для наступних матеріалів: зерно пшениці (густина 720 кг/м³); кормові гранули (670 кг/м³); пісок дрібнозернистий (1600 кг/м³).

Для забезпечення повторюваності експериментів кожену точку вимірювань повторював три рази, а отримані результати усереднював.

У досліді використовував три значення радіуса кривизни (120, 140 та 160 мм) та три кути нахилу жолоба (-10°, 0° та +10°).

продуктивності дозатора та провести подальший аналіз впливу окремих факторів.

Візуально оцінити вплив параметрів на продуктивність можна з наступних графіків.

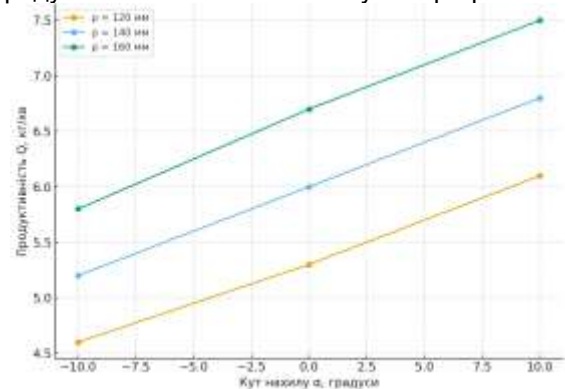


Рис. 2. Залежність продуктивності Q від кута нахилу α для різних радіусів кривизни робочої поверхні

Таблиця 3
Результати експериментальних вимірювань продуктивності гравітаційного дозатора.

№	ρ , мм	α , °	Q_1 , кг/хв	Q_2 , кг/хв	Q_3 , кг/хв	$Q_{\text{сер}}$, кг/хв
1	120	-10	4.6	4.5	4.7	4.6
2	120	0	5.2	5.4	5.3	5.3
3	120	+10	6.1	6.0	6.2	6.1
4	140	-10	5.2	5.3	5.2	5.2
5	140	0	6.0	6.0	6.1	6.0
6	140	+10	6.8	6.7	6.9	6.8
7	160	-10	5.8	5.7	5.9	5.8
8	160	0	6.6	6.7	6.8	6.7
9	160	+10	7.5	7.4	7.5	7.5

У результаті проведених вимірювань було отримано кількісні дані табл. 3, які відображають зміну продуктивності дозатора залежно від кута нахилу жолоба та його радіуса кривизни. Аналіз отриманих значень показав, що продуктивність зростає зі збільшенням кута нахилу від -10° до +10°, а також із збільшенням радіуса кривизни від 120 до 160 мм. Дані дають можливість побудувати математичну модель

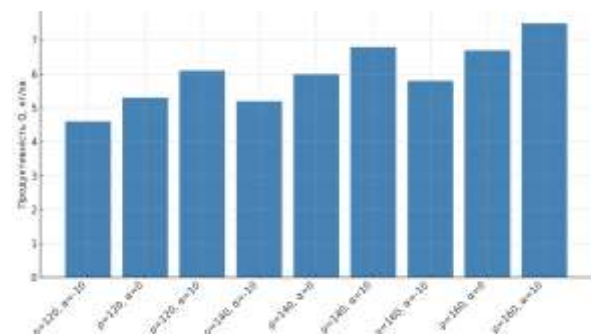
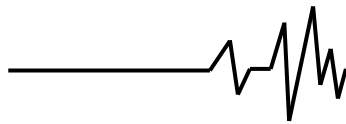


Рис. 3. Порівняння продуктивність при різних комбінаційних параметрах

Для опису взаємозв'язку між геометричними параметрами та продуктивністю було використано рівняння регресії другого порядку у вигляді:

$$Q = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2, \quad (2)$$

де x_1 - кодовий фактор радіуса кривизни жолоба ρ ;



x_2 - кодований фактор кута нахилу жолоба α ;

b_0 - вільний член, визначаю методикою [14, 15];

b_1, b_2 - лінійні коефіцієнти, визначаю методикою [14, 15];

b_{12} - коефіцієнт взаємодії факторів, визначаю методикою [14, 15];

b_{11}, b_{22} - квадратичні коефіцієнти, визначаю методикою [14, 15].

У результаті обчислень отримав рівняння:

$$Q = 6,02 + 0,57\rho + 0,43\alpha + 0,18\rho\alpha - 0,21\rho^2 - 0,15\alpha^2, (3)$$

яке добре апроксимує експериментальні дані. Коефіцієнт детермінації R^2 перевищив 0,98 [14, 15], що свідчить про високу адекватність моделі та коректно обраний тип функції.

Для наочності побуду 3D-поверхню відгуку $Q(\rho, \alpha)$, яка відображає комбінований

вплив двох факторів та дозволяє візуально визначити зону оптимуму.

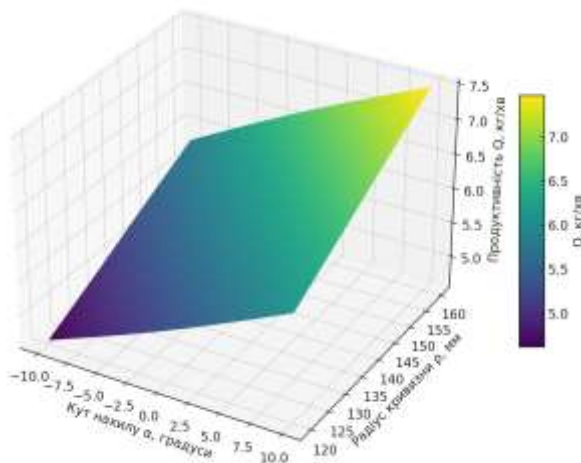


Рис. 4. Поверхня відгуку продуктивності дозатора

Аналіз графіка показав, що зі збільшенням кута нахилу робочої поверхні матеріал рухається швидше, а збільшення радіуса кривизни робочої поверхні сприяє стабільному ковзанню частинок без утворення заторів. Оптимальна зона продуктивності спостерігається при $\rho=140-150$ мм і $\alpha=8-12^\circ$, де Q досягає 7–7,5 кг/хв.

Таким чином, експериментально встановлено вплив основних конструктивних параметрів на продуктивність дозатора та отримано інженерну модель, придатну для подальшої оптимізації конструкції й практичного застосування у виробничих умовах.

Висновки. У роботі представлено результати експериментального дослідження

продуктивності гравітаційного дозатора сипких матеріалів залежно від його конструктивно-геометричних параметрів.

Розроблена експериментальна установка дала змогу проводити вимірювання з високою повторюваністю та стабільністю потоку.

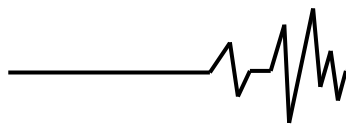
У ході роботи: розроблено та апробовано методику дослідження продуктивності дозатора за зміни радіуса кривизни робочої поверхні та кута його нахилу; проведено планований двофакторний експеримент, результати якого лягли в основу побудови математичної моделі; отримано рівняння регресії другого порядку з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,98$, що свідчить про високу адекватність моделі; виконано графічний аналіз впливу факторів, який підтвердив чітку тенденцію зростання продуктивності з підвищенням кута нахилу та радіуса жолоба; визначено оптимальні параметри $\rho=140-150$ мм та $\alpha=8-12^\circ$, за яких досягається максимальна продуктивність $Q_{\max} \approx 7,5$ кг/хв.

Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції гравітаційних дозаторів, а також для подальшої розробки автоматизованих систем дозування сипких матеріалів у сільськогосподарському та харчовому виробництві.

Запропонована методика дозволяє надійно визначати робочі параметри дозаторів, мінімізуючи похибки вимірювання та забезпечуючи високу повторюваність результатів.

Список використаних джерел

1. Nedderman, R. M. *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge University Press, 1992. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511600043>
2. Schulze, D. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Springer, 2008. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73768-1>
3. Pouliquen, O. Scaling laws in granular flows down rough inclined planes. *Physics of Fluids*, 11(3), 542–548, 1999. <https://doi.org/10.1063/1.870009>
4. Forterre, Y., & Pouliquen, O. Flows of dense granular media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40, 1–24, 2008. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142>
5. Jop, P., Forterre, Y., & Pouliquen, O. A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, 441(7094), 727–730, 2006. <https://doi.org/10.1038/nature04801>
6. Beverloo, W. A., Leniger, H. A., & Van de Velde, J. The flow of granular solids through orifices. *Chemical Engineering Science*, 15(3–4), 260–269, 1961. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(61\)85030-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(61)85030-6)



7. Box, G. E. P., & Wilson, K. B. On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 13(1), 1–45, 1951. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x>
8. Box, G. E. P., Hunter, W. G., & Hunter, J. S. *Statistics for Experimenters*. Wiley, 1978. <https://doi.org/10.1002/0471718130>
9. Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. Wiley, 2017.
10. Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. *Response Surface Methodology*. Wiley, 2016.
11. Aguilera Mena, D. I. J. A. Dynamic weighing liquid flow calibration system. *Flow Measurement and Instrumentation*, 33, 65–71, 2013.
12. Pope, J. G., Wright, J. D., & Mattingly, G. E. Liquid Flow Meter Calibrations with NIST's 15 kg/s Facility. *NIST Special Publication 250-98*, 2021. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.250-98>
13. Бембеник М. В., Дмитрів В. Т., Банга В. В., Городняк Р. М. Дозатор-змішувач сипких матеріалів: теорія і практика. Львів : СПОЛОМ, 2024. 172 с.
14. Дмитрів І. В. Теорія та технології наукових досліджень: механічна інженерія. Львів : СПОЛОМ, 2017. 212 с.
15. Дмитрів І. В. Автомобільний транспорт. Теорія і практика наукових досліджень. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2017. 212 с.

References

1. Nedderman, R. M., (1992). *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511600043> [in English].
2. Schulze, D., (2008). *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-73768-1> [in English].
3. Pouliquen, O. (1999). Scaling laws in granular flows down rough inclined planes. *Physics of Fluids*, 11(3), 542–548. <https://doi.org/10.1063/1.870009> [in English].
4. Forterre, Y., Pouliquen, O. (2008). Flows of dense granular media. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 40, 1–24. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102142> [in English].
5. Jop, P., Forterre, Y., Pouliquen, O. A. (2006). Constitutive law for dense granular flows. *Nature*, 441(7094), 727–730. <https://doi.org/10.1038/nature04801> [in English].
6. Beverloo, W. A., Leniger, H. A., Van de Velde, J. (1961). The flow of granular solids through orifices. *Chemical Engineering Science*, 15(3–4), 260–269. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(61\)85030-6](https://doi.org/10.1016/0009-2509(61)85030-6) [in English].

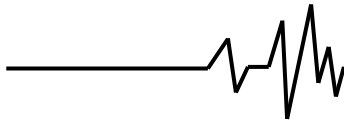
2509(61)85030-6 [in English].

7. Box, G. E. P., Wilson, K. B. (1951). On the Experimental Attainment of Optimum Conditions. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 13(1), 1–45. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1951.tb00067.x> [in English].
8. Box, G. E. P., Hunter, W. G., Hunter, J. S. (1978). *Statistics for Experimenters*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471718130> [in English].
9. Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley. [in English].
10. Myers, R. H., Montgomery, D. C., Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response Surface Methodology*. Wiley. [in English].
11. Aguilera Mena, D. A. (2013). Dynamic weighing liquid flow calibration system. *Flow Measurement and Instrumentation*, 33, 65–71. [in English].
12. Pope, J. G., Wright, J. D., Mattingly, G. E. (2021). Liquid Flow Meter Calibrations with NIST's 15 kg/s Facility. *NIST Special Publication 250-98*. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.250-98>. [in English].
13. Bembenyk, M., Dmytriv, V., Banga, V., Horodniak, R. (2024). *Dozator-zmishuvach sypkykh materialiv. Teoriia i praktyka* [Feeder-Mixer of Bulk Materials. Theory and Practice]. Lviv: SPOLOM, 172. [in Ukrainian].
14. Dmytriv, I. V. (2017). *Teoriia ta tekhnolohii naukovykh doslidzhen: mekhanichna inzheneriia* [Theory and Technologies of Scientific Research: Mechanical Engineering]. Lviv: SPOLOM, 212. [in Ukrainian].
15. Dmytriv, I. V. (2017). *Avtomobilnyi transport. Teoriia i praktyka naukovykh doslidzhen* [Automotive Transport. Theory and Practice of Scientific Research]. Lviv Polytechnic National University. Lviv: SPOLOM, 212. [in Ukrainian].

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PRODUCTIVITY OF A GRAVITATIONAL FEEDER FOR BULK MATERIALS

The article presents the results of an experimental study on the performance of a gravitational feeder for bulk materials as a function of its geometric parameters. The main objective of the research was to establish a quantitative relationship between the curvature radius of the chute and its inclination angle, and to determine the optimal combination of parameters that ensure maximum material flow rate and stable operation. To achieve this, a two-factor experimental design with three levels of each factor was applied, providing a reliable data set with high repeatability.

The experiments were conducted on a specially designed laboratory setup that allows adjustment of both chute curvature and inclination angle. Measurements were performed for nine



combinations of factors with three replications at each point. The flow rate was calculated from mass and time measurements, and statistical analysis was carried out to evaluate repeatability. The coefficient of variation did not exceed 5%, indicating stable flow and reliable experimental results.

A second-order regression equation was developed to describe the relationship between productivity and the two influencing factors. The obtained coefficient of determination $R^2=0,98$ confirms the high accuracy and adequacy of the model. The results show that increasing the inclination angle from -10° to $+10^\circ$ increases productivity by 40–45%, while increasing the curvature radius from 120 mm to 160 mm adds another 25%. The maximum productivity of $Q=7,5$

kg/min is achieved at $p=160$ mm and $\alpha=10^\circ$. The optimal operating zone is located at $p=140-150$ mm and $\alpha=8-12^\circ$.

Graphical interpretation using linear plots, contour diagrams and histograms supports the obtained results. The practical significance of this study lies in the possibility of applying the derived mathematical model and experimentally established patterns for the design and optimization of gravitational feeders in agricultural, food and construction industries, as well as for the development of automated dosing control systems.

Keywords: gravitational feeder, bulk materials, productivity, inclination angle, curvature radius, experiment, modeling, technical efficiency.

Відомості про автора

Серпутько Роман Сергійович - здобувач третього освітньо-наукового рівня кафедри ПМАІ, Національного університету «Львівська політехніка» (вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013, e-mail: roman.s.serputko@lpnu.ua), ORCID 0009-0004-9324-0368

Serputko Roman - Recipient of the Third Educational and Scientific Level of PMAI, Lviv Polytechnic National University (12 Stepan Bandera Str., Lviv, Ukraine, 79013, e-mail: roman.s.serputko@lpnu.ua), ORCID 0009-0004-9324-0368.

Стаття надійшла 20.10.2025

Стаття прийнята 01.11.2025

Опубліковано 25.12.2025