

М.О. Пристайло, М.М. Балака, А.Г. Поліщук, І.П. Гонта

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ҐРУНТУ НАКОНЕЧНИКОМ З ДИНАМІЧНОЮ РІЖУЧОЮ КРОМКОЮ

Анотація. У статті наведено результати експериментальних досліджень процесу різання ґрунту наконечником з динамічною ріжучою кромкою. Розглянуто актуальну задачу підвищення енергоефективності процесу різання шляхом використання пневмоакумулятора. Проблема полягає у недостатній точності існуючих теоретичних моделей, що зумовлює необхідність експериментального уточнення силових параметрів взаємодії робочого органу з ґрунтовим середовищем. Метою дослідження є експериментальне визначення сили різання та встановлення закономірностей її зміни залежно від тиску в пневмоакумуляторі. У роботі застосовано методи фізичного моделювання з використанням парафінового середовища, тензометричних вимірювань та математичної обробки результатів експерименту. Встановлено нелінійний характер залежності сили різання від тиску, який має U-подібну форму. Визначено оптимальний діапазон тиску, за якого досягається мінімальний опір різанню та забезпечується найбільш енергоефективний режим роботи системи. Порівняння експериментальних і теоретичних результатів показало їх узгодженість із похибкою до 11 %, що підтверджує адекватність запропонованої моделі. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні та оптимізації робочих органів машин.

Ключові слова: різання ґрунту, динамічна ріжуча кромка, пневмоакумулятор, сила різання, тиск, експеримент, коефіцієнт подібності, енергоефективність, модель.

Постановка проблеми. Процес різання ґрунту є одним з основних механічних процесів у роботі будівельно-дорожніх і спеціальних машин, що безпосередньо визначає їх енергетичні витрати, навантаження на робочі органи та продуктивність. Водночас існуючі теоретичні моделі недостатньо точно описують силові параметри взаємодії ріжучого елемента з ґрунтовим середовищем, особливо в умовах застосування динамічних робочих органів, які змінюють характер навантаження та механізм руйнування ґрунту. Це зумовлює необхідність експериментального уточнення та подальшого вдосконалення закономірностей процесу різання ґрунту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання визначення силових параметрів процесу різання ґрунту розглядається у наукових роботах, оснований на положеннях механіки суцільного середовища, теорії граничної рівноваги та енергетичних підходах до руйнування ґрунтового масиву [1, 2]. У класичних дослідженнях встановлено залежність сил опору різанню від фізико-механічних властивостей ґрунту, геометрії

ріжучого інструмента та режимів його роботи [3, 4]. Подальший розвиток отримали чисельні методи моделювання, зокрема метод скінченних елементів та метод дискретних елементів, які дозволяють детально описувати процес формування зони руйнування та напружено-деформований стан ґрунту [5]. Водночас встановлено, що такі моделі характеризуються високою чутливістю до параметрів ґрунтового середовища та граничних умов, що зумовлює необхідність їх експериментальної верифікації [6].

У ряді робіт показано, що процес різання ґрунту має суттєво нелінійний характер, зумовлений його неоднорідністю, структурною будовою та пружно-пластичними властивостями, що призводить до розбіжностей між теоретичними та експериментальними значеннями силових параметрів [7]. Разом з тим, недостатньо вивченими є питання впливу динамічно-акумуляюючих елементів на силові параметри процесу різання ґрунту та умови реалізації мінімального енергетичного опору [5, 8].

Мета досліджень. Метою дослідження є експериментальне визначення сили різання ґрунту та встановлення закономірностей її зміни залежно від тиску в пневмоаккумуляторі робочого органу з динамічною ріжучою кромкою.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для проведення досліджень використовувалась лабораторна установка для моделювання процесу різання ґрунту наконечником із динамічною ріжучою кромкою на пневмоаккумуляторі (рисунок 1), яка містить такі основні вузли [6]:

- ґрунтовий лоток, що забезпечує візуальний доступ до моделі ґрунту;
- механізм переміщення наконечника з плавним регулюванням швидкості в діапазоні 0,01–0,10 м/с;
- наконечник з динамічною ріжучою кромкою, шарнірно або пружно з'єднаний з корпусом через пневмоаккумулятор;
- силовимірювальний вузол, призначений для реєстрації горизонтальної складової сили різання $F(t)$ та, за необхідності, вертикальної складової $N(t)$;
- гідропневматичний контур, що включає пневмоаккумулятор, запірно-регульовальну арматуру та датчик тиску $p_{ак}(t)$;
- систему збору та реєстрації даних, яка забезпечує синхронний запис сигналів тензометричних датчиків, датчика тиску та переміщення.

Використані підходи до побудови лабораторної установки узгоджуються з раніше розробленими рішеннями для реєстрації зусиль різання [6, 7]. Робочий орган (рисунок 2) являє собою клиноподібний наконечник з основною ріжучою кромкою та, за необхідності, лідируючою кромкою, яка випереджає основну та формує попередній надріз у моделі ґрунту, як це наведено у попередніх дослідженнях [8]. Ріжуча кромка шарнірно приєднана до корпусу наконечника та взаємодіє з ним через пневмоаккумулятор. Під час проходження зон підвищеного опору ріжуча кромка відхиляється, що призводить до стискання робочого середовища в аккумуляторі. Після проходження перешкоди частина накопиченої енергії повертається в систему, забезпечуючи згладжування коливань навантаження та стабілізацію процесу різання.

Основними регульованими параметрами є:

- кут загострення ріжучої кромки α ;
- кут встановлення кромки відносно напрямку руху;
- початковий тиск у пневмоакумуляторі $p_{ак}$;
- жорсткість газової «пружини», що визначається $p(V)$.

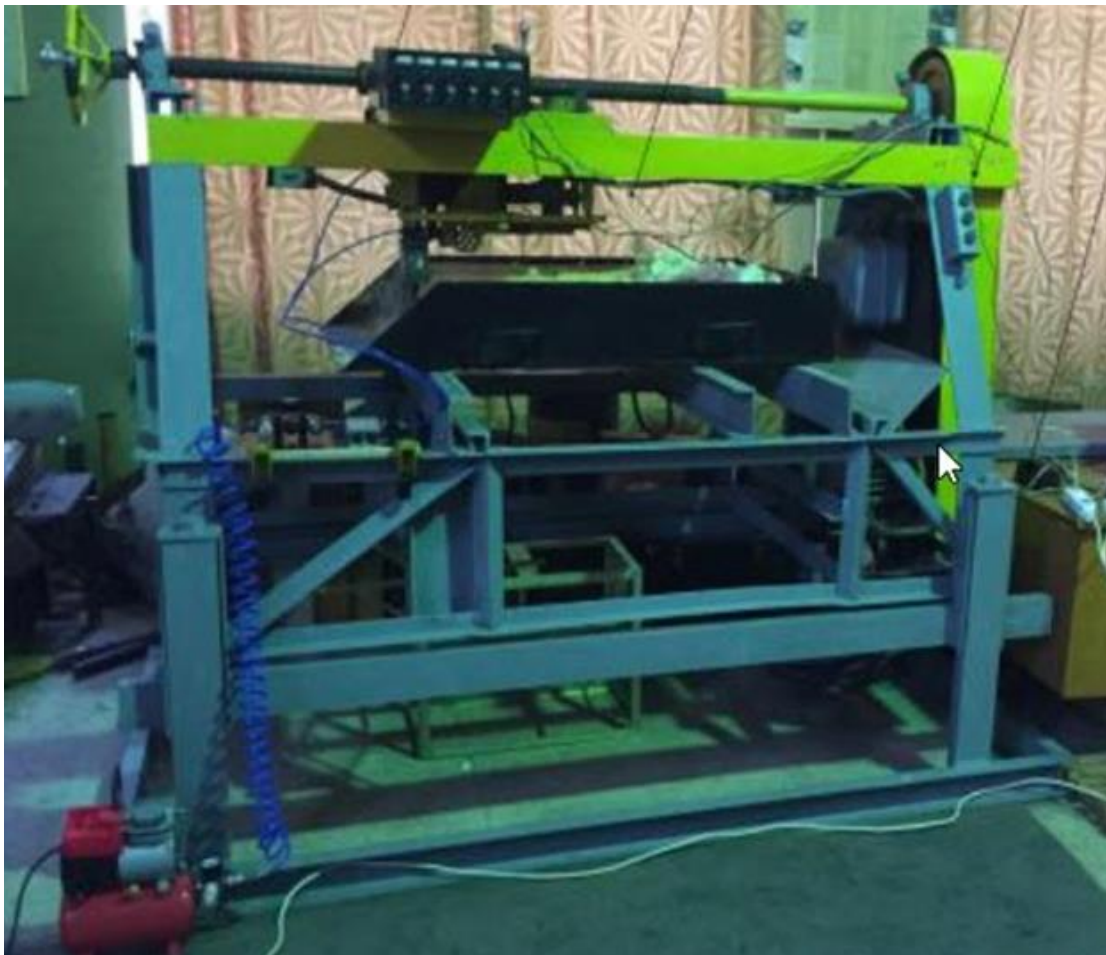


Рисунок 1 – Лабораторна установка для дослідження процесу різання моделі ґрунту наконечником з динамічною ріжучою кромкою



Рисунок 2 – Наконечник з динамічною ріжучою кромкою на пневмоакумуляторі

Як модель ґрунту використано парафін розмірами $L \times B \times H = 0,8 \times 0,2 \times 0,1$ м, що за реологічними та механічними характеристиками забезпечує наближене моделювання пружно-пластичної поведінки зв'язних ґрунтів [2, 6], зокрема їх здатності до пластичного деформування та утворення зони зрізу.

Різання моделі ґрунту здійснювалось при стабільній швидкості переміщення робочого органу не більше 0,09 м/с, із варіюванням тиску в пневмоакумуляторі в діапазоні від 0 до 15 МПа з кроком 2,5 МПа. Під час експерименту виконувалась безперервна реєстрація тангенціальної складової сили різання, яка характеризує роботу руйнування матеріалу та подолання сил тертя на контактних поверхнях.

При відсутності тиску в пневмоакумуляторі (рисунок 3, а) процес різання характеризується нестабільним режимом: середнє значення сили становить близько 12,4 кН, а сигнал має хаотичний характер зі значною шумовою складовою, спостерігаються короткочасні пікові перевантаження та провали.

При тиску 2,5 МПа (рисунок 3, б) фіксується зниження середнього рівня сили до приблизно 10,5 кН та поява перехідного процесу зі стабілізацією сигналу, часткове демпфування коливань і перехід системи до квазістаціонарного режиму.

При тиску 5 МПа (рисунок 3, в) середнє значення сили зменшується до 9,75 кН, а характер сигналу набуває вираженої циклічності. При цьому формується автоколивальний режим, що відображає періодичне накопичення та вивільнення енергії в системі «робочий орган – ґрунтове середовище».

При тиску 7,5 МПа (рисунок 3, г) спостерігається подальше зниження середньої сили до 9,16 кН та більш упорядкований характер коливань. У цьому режимі досягається мінімальний опір різанню, що відповідає енергоефективній роботі системи.

При підвищенні тиску до 10 МПа (рисунок 3, д) середнє значення сили знижується до 8,66 кН, однак зростає амплітуда миттєвих коливань і з'являються імпульсні навантаження. Це свідчить про перехід до режиму жорсткішої взаємодії, за якого пневмоакумулятор не лише демпфує, але й активно впливає на динаміку процесу різання.

При тиску 12,5 МПа (рисунок 3, е) спостерігається зростання середнього значення сили до 9,26 кН та збільшення амплітуди коливань, що вказує на порушення оптимального режиму та підвищення енергетичної нестабільності.

При максимальному дослідженому тиску 15 МПа (рисунок 3, є) середня сила зростає до 11,55 кН, сигнал характеризується значними імпульсними піками та високою дисперсією. Це пояснюється переходом до жорсткого ударного контакту, втратою демпфуючого ефекту та збільшенням опору різанню.

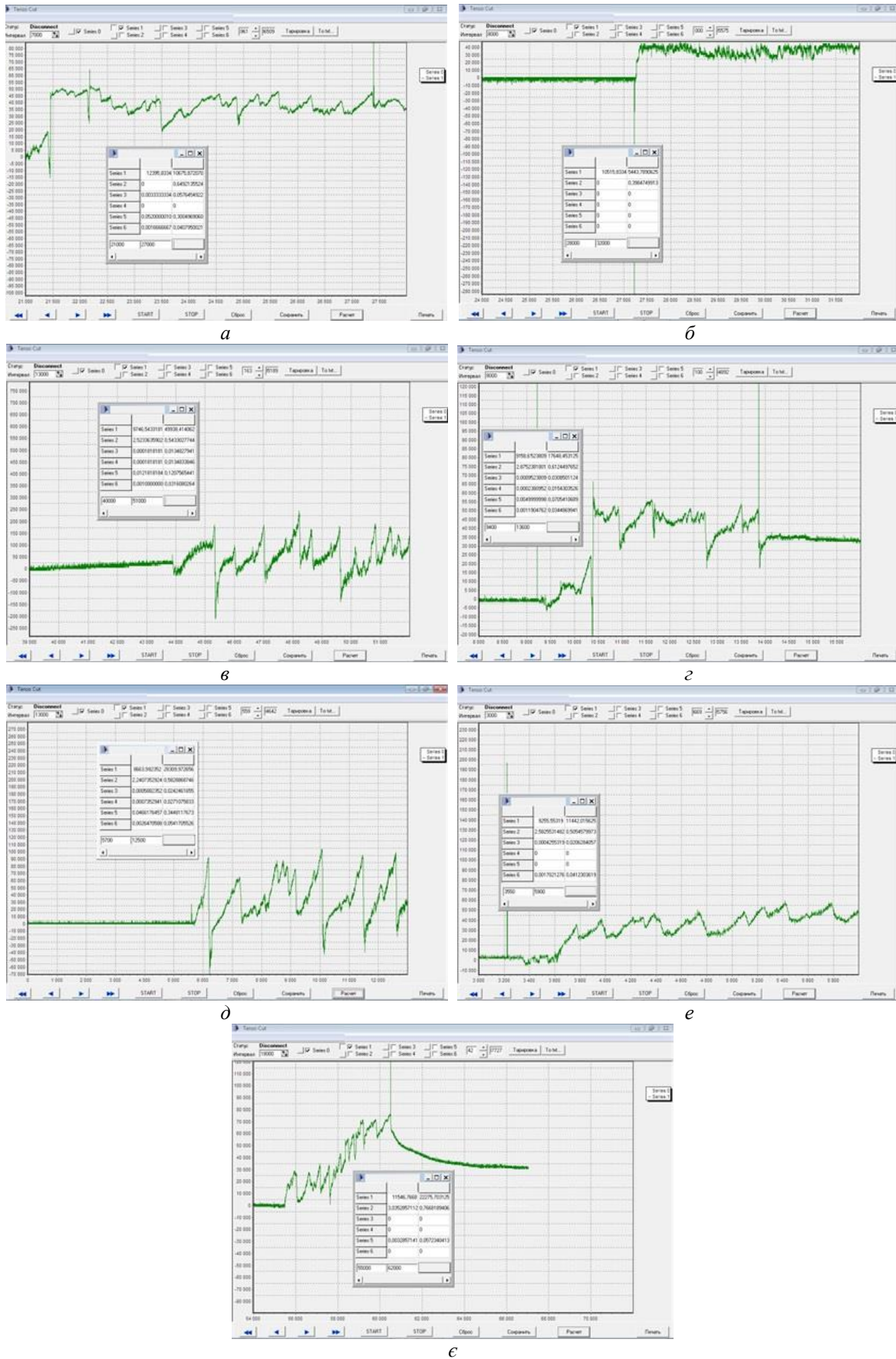


Рисунок 3 – Осцилограми зміни сили різання при різних значеннях тиску (від 0 до 15 МПа з кроком 2,5 МПа) в пневмоакумуляторі

Узагальнена експериментальна залежність (рисунок 4) свідчить про нелінійний характер зміни сили різання від тиску в пневмоакумуляторі. Крива має виражену U-подібну форму: зі зростанням тиску від 0 до 7,5–10 МПа сила різання зменшується, досягаючи мінімального значення, після чого знову зростає. Це підтверджує наявність оптимального діапазону тиску, за якого забезпечується мінімальний силовий опір і найвища енергоефективність процесу.

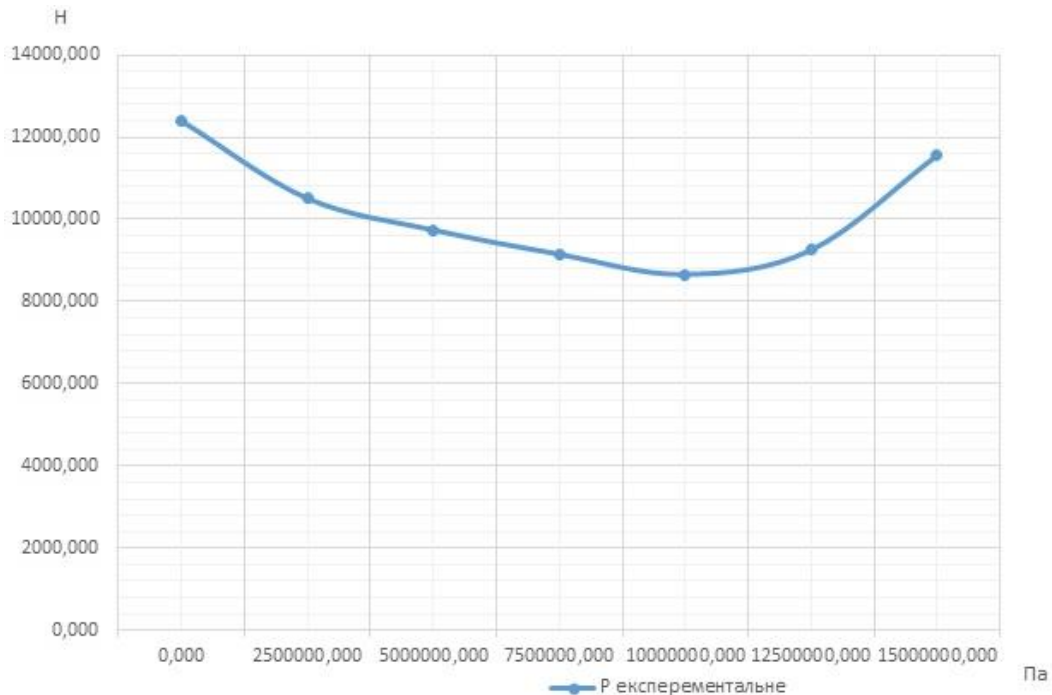


Рисунок 4 – Узагальнена залежність середнього значення сили від тиску

У межах проведених експериментальних досліджень встановлено вплив тиску в пневмоакумуляторі на силу опору різання моделі ґрунту (парафіну) клиноподібним наконечником із динамічною ріжучою кромкою.

Діапазон зміни тиску становив 0–15 МПа. Отримані результати свідчать про виражений нелінійний характер залежності сили різання від тиску в пневмоакумуляторі. Зокрема, при відсутності тиску (0 МПа) середнє значення сили опору різання досягає максимального рівня і становить близько 12,4 кН. З підвищенням тиску до 2,5–5,0 МПа спостерігається інтенсивне зниження сили до рівня 9,7–10,5 кН, що зумовлено появою демпфувального ефекту та частковою стабілізацією процесу руйнування.

Подальше збільшення тиску до 7,5–10 МПа супроводжується досягненням мінімальних значень сили різання (близько 8,7–9,2 кН), що відповідає найбільш раціональному режиму роботи системи. У цьому діапазоні забезпечується узгоджена взаємодія між жорсткістю системи та енергетичними параметрами процесу, що сприяє зниженню питомих витрат енергії.

Разом з тим, при подальшому підвищенні тиску до 12,5–15 МПа спостерігається зростання сили різання до 9,3–11,5 кН, що свідчить про порушення оптимального режиму. Це пояснюється підвищенням жорсткості системи «наконечник – акумулятор – середовище», зростанням контактних напружень та інтенсифікацією сил тертя.

Узагальнення експериментальних даних показує, що амплітуда зміни сили різання у дослідженому діапазоні становить близько 3,7 кН. Незважаючи на відносно помірну величину зміни, вона має систематичний і відтворюваний характер, що підтверджує суттєвий вплив параметрів пневмоакумулятора на механіку процесу руйнування модельного середовища.

Характер отриманої залежності має квазіпараболічний вигляд і може бути інтерпретований як результат зміни жорсткісно-енергетичних параметрів системи. При малих значеннях тиску відсутня ефективна компенсація динамічних навантажень, що призводить до збільшення зони пластичної деформації та зростання енергетичних втрат. У середньому діапазоні тисків відбувається стабілізація процесу формування зони руйнування та зменшення питомої роботи різання. Натомість при надмірних значеннях тиску система набуває підвищеної жорсткості, що зумовлює зростання силового опору.

У межах проведених досліджень встановлено наявність оптимального діапазону тиску в пневмоакумуляторі, який для даних умов становить близько 8–10 МПа.

З огляду на встановлений U-подібний характер залежності сили різання від тиску, для її опису застосовано апроксимацію поліномом другого порядку

$$P_s(P_z) = aP_z^2 + bP_z + c. \quad (1)$$

Обробка експериментальних даних методом найменших квадратів дозволила отримати відповідну аналітичну залежність

$$P_s(P_z) = 0,036P_z^2 - 0,71P_z + 12,3 \quad (2)$$

з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,91$, що свідчить про достатньо високий рівень адекватності моделі.

Аналіз отриманої функції показує, що мінімум сили різання досягається при певному тиску, яке відповідає оптимальному режиму роботи системи:

$$\frac{dP_s}{dP_z} = 2aP_z + b = 0 \Rightarrow P_z^* = -\frac{b}{2a}. \quad (3)$$

Підставляючи коефіцієнти, $P_z^* \approx 10$ МПа, мінімальне значення сили буде $P_{z.min} \approx 8,6$ кН. У цій точці забезпечується найменший силовий опір та найбільш ефективне використання енергії.

Отримані результати можуть бути пояснені з позицій енергетичного балансу процесу різання. На початковому етапі збільшення тиску в пневмоакумуляторі сприяє стабілізації фронту руйнування та зменшенню коливань у зоні зрізу, що призводить до зниження питомих витрат енергії. Після досягнення оптимального значення тиску подальше його зростання зумовлює інтенсивніше ущільнення матеріалу, підвищення нормальних напружень і, як наслідок, збільшення сил тертя. У цьому випадку додаткова енергія витрачається не на руйнування матеріалу, а на подолання внутрішнього опору середовища, що призводить до зростання сили різання.

Для оцінки адекватності отриманих експериментальних даних виконаємо порівняння з результатами теоретичного моделювання (рисунок 5).

Експериментальні значення сили різання приведено до натурних умов із використанням коефіцієнтів подібності. Аналіз графіків показує, що експериментальна та теоретична залежності мають однакові межі зміни та подібний характер. При цьому спостерігається незначне перевищення експериментальних значень, що пояснюється впливом додаткових факторів, не врахованих у теоретичній моделі (неоднорідність середовища, втрати на тертя).

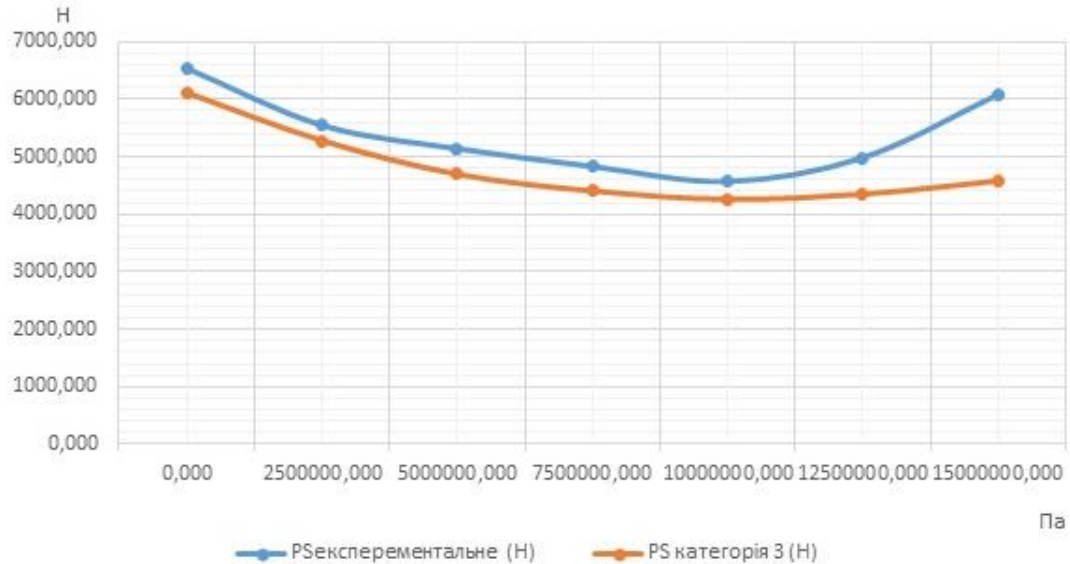


Рисунок 5 – Порівняння сил різання ґрунту, отриманих теоретичним та експериментальним методами

Величина розбіжності між результатами не перевищує 11 %, що свідчить про достатню адекватність запропонованої теоретичної моделі та можливість її використання для інженерних розрахунків.

Висновки. Встановлено, що залежність сили різання ґрунту від тиску в пневмоакумуляторі в діапазоні 0–15 МПа має U-подібний характер: при зростанні тиску до 7,5–10 МПа сила зменшується з 12,4 до 8,7–9,2 кН (на 25–30 %), після чого зростає до 11,5 кН. Визначено оптимальний діапазон тиску 7,5–10 МПа, при якому досягається мінімальний силовий опір і енергоефективний режим роботи системи. Показано узгодженість експериментальних і теоретичних результатів (розбіжність до 11 %), що підтверджує адекватність моделі та можливість її використання для інженерних розрахунків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mase G. T., Smelser R. E., Rossmann J. S. Continuum Mechanics for Engineers. 4th ed. Boca Raton. CRC Press, 2020. 450 p.
2. Шашенко О. М., Шаповал В. Г., Гапєєв С. М., Скобенко О. В., Хозяїкіна Н. В. Механіка ґрунтів. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2024. 339 с.
3. Look V. G. Earthworks: Theory to Practice – Design and Construction. Boca Raton. CRC Press, 2022. 590 p.
4. Хмара Л. А., Кравець С. В., Скоблюк М. П., Нікітін В. Г., Деревянчук М. І., Супонєв В. М. Машина для земляних робіт. Харків: ХНАДУ, 2014. 546 с.

5. Prystailo M., Balaka M., Mozharivskiy V., Drachuk V., Honta I. Superposition principle of impact on the working environment of actuating elements for site preparation machines. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, 2024, Vol. 1 No. 105, 61–67. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.1.61>.
6. Rashkivskiy V., Prystailo M., Fedyshyn B., Balaka M. Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 2025, 4(1), 79–92. URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.07>.
7. Лук'янчук О. П., Степанюк Б. І., Форсюк С. Л. Експериментальне дослідження зміни зусилля різання залежно від умов розробки ґрунту. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування, 2024, Вип. 2 (106), С. 3–12. URL: <https://doi.org/10.31713/vt220241>.
8. Prystailo M. O., Balaka M. M., Polishchuk A. G., Kozak A. A., Honta I. P. Optimization of soil cutting process by ripper tip with dynamic cutting edge. Strength of Materials and Theory of Structures, 2025, Issue 115, P. 325–334. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.115.325-334>.

REFERENCES

1. Masem, G. T., Smelser, R. E. & Rossmann, J. S. (2020). Continuum Mechanics for Engineers. 4th ed. Boca Raton. CRC Press. 450 p.
2. Shashenko, O. M., Shapoval, V. H., Hapiev, S. M., Skobenko, O. V. & Khoziaikina, N. V. (2024). Mekhanika gruntiv [Soil mechanics]. Dnipro: NTU «Dniprovska politehnika». 339 p.
3. Look, B. G. (2022). Earthworks: Theory to Practice – Design and Construction. Boca Raton. CRC Press. 590 p.
4. Khmara, L. A., Kravets, S. V., Skobliuk, M. P., Nikitin, V. H., Derevianchuk, M. I. & Saponiev, V. M. (2014). Mashyny dlia zemlianykh robit [Machines for earthmoving]. Kharkiv: KhNADU. 546 p.
5. Prystailo, M., Balaka, M., Mozharivskiy, V., Drachuk, V. & Honta, I. (2024). Superposition principle of impact on the working environment of actuating elements for site preparation machines. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, Vol. 1 No. 105, 61–67. URL: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.105.1.61>.
6. Rashkivskiy, V., Prystailo, M., Fedyshyn, B. & Balaka, M. (2025). Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. International Science Journal of Engineering & Agriculture, 4(1), 79–92. URL: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.07>.
7. Lukianchuk, O. P., Stepaniuk, B. I. & Forsiuk, S. L. (2024). Eksperymentalne doslidzhenia zminy zusyillia rizannia zalezno vid umov rozrobky ґрунту [Experimental study of the change in cutting effort depending on the conditions of soil development]. Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia – Bulletin of the National University of Water Management and Natural Resources, Issue 2 (106), 3–12. URL: <https://doi.org/10.31713/vt220241>.

8. Prystailo, M. O., Balaka, M. M., Polishchuk, A. G., Kozak, A. A. & Honta, I. P. (2025). Optimization of soil cutting process by ripper tip with dynamic cutting edge. *Strength of Materials and Theory of Structures*, Issue 115, 325–334. URL: <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.115.325-334>.

Received 30.03.2026.

Accepted 02.04.2026.

Published 30.04.2026

Experimental study of soil cutting with dynamic cutting edge tip

The experimental study results of the of soil cutting with dynamic cutting edge tip and the pneumatic accumulator are presented in the paper. Recent research and publications indicate increasing attention to improving the energy efficiency of earthmoving processes through adaptive and energy-storing working elements; however, existing theoretical models remain insufficiently accurate for predicting force interaction parameters in complex soil–tool systems. This creates the need for experimental verification and refinement of analytical approaches. The purpose of the study is to experimentally determine the cutting resistance force and to establish its dependence on the pressure level in the pneumatic accumulator. The main research methods include physical modeling using the paraffin-based soil analogue, strain-gauge measurements, and mathematical processing of experimental data with subsequent comparative analysis against theoretical predictions. The obtained results demonstrate the pronounced nonlinear dependence of cutting force on pressure, characterized by the U-shaped curve. It was found that the system exhibits an optimal pressure range, within which the minimum cutting resistance and the most energy-efficient operating regime are achieved. Outside this range, both low and excessive pressure levels lead to increased cutting resistance due to insufficient damping or excessive system rigidity. The comparison between experimental and theoretical results showed good agreement, with the deviation of up to 11%, confirming the adequacy of the proposed theoretical model. The results obtained can be used for the design and optimization of working elements of construction machinery aimed at reducing energy consumption and improving operational efficiency.

Keywords: soil cutting, dynamic cutting edge, pneumatic accumulator, cutting force, pressure, experiment, similarity factors, energy efficiency, model.

Пристайло Микола Олексійович – к.т.н., доцент, професор кафедри будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-4680>

Балака Максим Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4142-9703>

Поліщук Андрій Григорович – к.т.н., асистент кафедри будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-9932>

Гонта Ігор Петрович – аспірант кафедри будівельних машин, Київський національний університет будівництва і архітектури.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4441-8049>

Prystailo Mykola – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Construction Machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3151-4680>

Balaka Maksym – Candidate of Science (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction Machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4142-9703>

Polishchuk Andrii – Candidate of Science (Engineering), Assistant of the Department of Construction Machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-9932>

Honta Ihor – Postgraduate Student of the Department of Construction Machinery, Kyiv National University of Construction and Architecture.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4441-8049>