

УДК 631.173

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.43

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ГЛИБИНИ БЛОКОВАНОГО РІЗАННЯ ҐРУНТІВ РІЗЦЯМИ ТА ДОВЖИНИ ЛЕМЕША ЛАНЦЮГОВИХ ЕКСКАВАТОРІВ

Кравець С. В.¹, Супонєв В. М.², Гапонов О. О.², Рагулін В. М.², Щукін О. В.²,
Дмитренко О. А.³

¹Національний університет водного господарства та природокористування,

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

³Харківський державний автомобільно-дорожній коледж

Анотація. Розглянуто методику експериментальних досліджень та пристрої для реалізації робочих процесів розробки траншеї ланцюгово-скребковими екскаваторами, визначено критичну глибину асиметричного блокованого різання ґрунту різцями і довжину лемеша, проведено порівняння встановлених результатів із теоретичними даними.

Ключові слова: копання траншеї, траншейний екскаватор, скребковий екскаватор, скребок, різець, критична глибина, різання ґрунту, сила опору.

Вступ

Розвиток цивільного і промислового будівництва та зростання тенденції будівництва підземних комунікацій призвели до збільшення об'єму робіт по укладанню газонафтопроводів, водоводів, каналізаційних систем, енергетичних кабелів і кабелів зв'язку. Значна частина земляних робіт під час будівництва цих комунікацій виконується траншейними екскаваторами. Удосконалення процесів розробки ґрунту різцями в умовах критично глибинного різання ґрунту, яке націлене на зменшення енерговитрат на розробку траншеї та підвищення продуктивності траншейних екскаваторів, є актуальною задачею.

Аналіз публікацій

Прокладання лінійної частини трубопроводів виконується як з її укладанням у відкритому траншею [1], так і безтраншейними методами [2–4]. Незважаючи на переваги останніх, будівництво протяжних ділянок виконується традиційним траншейним способом. В усьому світі формування траншеї при цьому виконується спеціалізованими фірмами землерийними машинами загальнобудівельного призначення або спеціальними скребковими та роторними траншейними екскаваторами, які є більш продуктивними та ефективними для виконання цих операцій. Прокладання трубопроводів у цьому випадку виконується, зазвичай, спеціалізованими компаніями. В Україні це ПАТ «Укртрансгаз» та «Укртранснафта», в Росії – РАО «Газпром» та АК «Транснефть» та їх підрядники

[1], в США – компанії «Shell», «Chevron Pipeline», «Natural Gas Pipeline Company of America», «Esso Pipeline» [5–7], в Саудівській Аравії – «Saudi Arabian Oil Company» та «Trans-Arabian Pipeline Company» [8, 9].

У світі виробляється цілий ряд землерийних машин безперервної дії достатнього технічного рівня. А саме: ПЗМ-3, ЕТЦ-200 в Україні, ТМК-3, ЕТР-254А, ЕТЦ-252 – в Росії, Vermeer T955 Commander III та Vermeer 1055 Commander III [10], Trencor 1460 HD та Trencor 1080 HD [11], Cleveland B-92 та Cleveland IC-36 [12] та ін. Ці екскаватори призначені для спорудження протяжних виїмок заданого профілю у відкритому полі. Їх продуктивність та ефективність використання визначають темпи та собівартість виконання робіт із прокладання інженерних комунікацій. Тому вдосконалення робочого обладнання траншейних екскаваторів скребкового типу, яке націлене на підвищення ефективності його роботи, є важливою науковою задачею.

Проведений огляд виявив багато досліджень по удосконаленню процесу копання траншеї землерийними машинами. Так, у статті [13] розглядається співвідношення первинної вологості ґрунту на тривалість вивантаження ковша екскаватора у вигляді полінома другого ступеня. Але вплив форми, кількості та розміщення різців на продуктивність машини не розглядається.

Визначення сил, що діють на ківш гідравлічного екскаватора під час розробки ґрунту, для вирішення питання розвитку безпілотних землерийних машин розглядається в роботі

[14]. Питання роботи траншейних екскаваторів не розглядається.

Визначення величини та закономірності розподілу експлуатаційних навантажень, що діють на ковшовий екскаватор, які можуть привести до втрати стійкості машини, досліджується в роботі [15]. Втрата стійкості багатокішшевих екскаваторів у роботі не розглядається.

В роботі [16] представлена методологія створення легкої та високоміцної конструкції ковша екскаватора при невизначеному його навантаженні. Однак вплив середовища на параметри робочого обладнання не розглядався.

На основі наукових досліджень процесів копання траншей багатоскребковими екскаваторами безперервної дії в роботі [17] закладено основи проектування екскаваторів безперервної дії, визначено раціональні конструктивні та кінематичні параметри робочого обладнання. Але оцінка енерговитрат не наводиться.

Запропоновані розрахункові залежності процесів різання ґрунтів та тяглові розрахунки в роботі [18] також не дають чіткої відповіді на це питання.

Визначення раціональних технологічних режимів роботи траншейних ланцюгових екскаваторів за рахунок інноваційних землерийних машин безперервної дії подано в роботі [19]. Вибір головних параметрів різального інструменту ланцюгових екскаваторів також розглядається в роботі [20], але робота різців у режимі критичних глибин не розглядається.

Можливість підвищення продуктивності та зменшення енерговитрат роботи ланцюгових екскаваторів за рахунок роботи їх різців у режимі критично глибинного різання ґрунтів розглядається в роботі [21]. Але експериментального підтвердження цих досліджень не наводиться.

Таким чином, можна стверджувати, що проведення експериментального дослідження, яке спрямовано на визначення критичної глибини асиметричного блокованого різання і довжини лемеша багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів, є доцільним.

Мета і постановка завдання

Метою статті є експериментальне визначення критичної глибини асиметричного блокованого різання і довжини лемеша багатоскребкових ланцюгових траншейних екскаваторів.

Методика проведення експериментальних досліджень

Дослідження робочих процесів різання ґрунту проводилися зі зразками зубів та скребків ланцюгових екскаваторів на ґрунтовому каналі кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання НУВГП. Ґрунтовий канал призначений для експериментального дослідження робочих органів землерийних машин і обладнання та дозволяє визначити зусилля, що діють на окремі вузли і деталі машини; тяговий опір, що виникає під час переміщення робочих органів машин; дослідити взаємодію моделей робочих органів із ґрунтом.

Ґрунтовий канал являє собою бетонний лоток із розмірами $10 \times 1,8 \times 1,5$ м, заповнений піщано-глинистою сумішшю, склад якої можна змінювати (рис. 1). Над каналом по рейках пересувається динамометрично-тензометричний візок 11, який являє собою зварну конструкцію, що спирається на чотири ходові колеса 10 з ребордами (рис. 2). Для пересування динамометрично-тензометричного візка запроєктований привод, який забезпечує необхідне тягове зусилля, широкий діапазон швидкостей пересування візка та плавність його ходу. В якості силового обладнання прийнято електро двигун трифазного струму 3, трансмісію 1, 2, 4 трактора ДТ-75Б і барабан будівельної лебідки 19.



Рис. 1. Загальний вигляд ґрунтового каналу з тензометричним візком

Обертний момент від двигуна 3 за допомогою ланцюгової передачі 5 передається на вхідний вал ходозменшувача 4 і далі – на коробку зміни передач 2. Для збільшення передатного числа і полегшення керування

переміщенням візка використаний задній міст 1 трактора ДТ-75Б, який складається з головної передачі, бортового фрикціону і бортового редуктора. На вихідному валу правого бортового редуктора встановлена ведуча зірочка ланцюгової передачі 20 (рис. 2), що служить для передачі обертового моменту на вал барабана 19. Ходозменшувач разом із коробкою зміни передач дозволяє змінити швидкість пересування візка в широких межах від 0,01–3 м/хв. Механізм пересування візка – трособлоковий. Трос 18 трособлокового механізму одним кінцем закріплюється до ручної лебідки 6, проходить через напрямні блоки візка 9 і 17, виходить на барабан 19, з якого – на нерухомий блок 15, до якого закріплено електронний динамометр 22, і далі знову на напрямні блоки візка 16, 12. Другим кінцем трос кріпиться до механічного динамометра ДПУ-2-2 13, з'єданого з нерухомою опорою 14. Візок зварної конструкції 11 опирається на чотири котки 10 з ребордами і рухається уздовж каналу 8. Така конструкція дозволяє уникнути перекосу візка під час руху вздовж каналу.

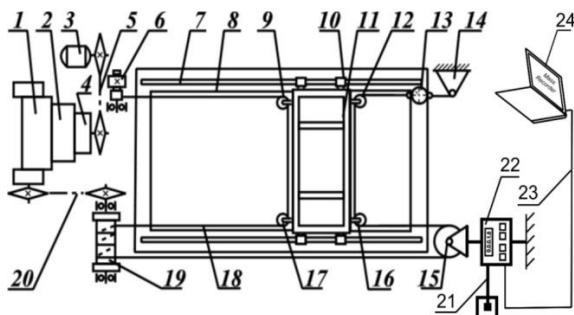


Рис. 2. Кінематична схема привода тензометричного візка: 1 – редуктор; 2 – коробка передач; 3 – електродвигун; 4 – ходозменшувач; 5, 20 – ланцюгові передачі; 6 – ручна лебідка; 7 – рейки; 8 – канал; 9, 12, 16, 17 – напрямні блоки візка; 10 – котки; 11 – тензовізок; 13 – динамометр; 14 – опора; 15 – нерухомий блок; 18 – трос; 19 – барабан; 20 – привод барабана; 21 – кабель живлення електронного динамометра; 22 – електронний динамометр Н 1500–1; 23 – СОМ кабель; 24 – ноутбук

Принцип дії динамометра оснований на перетворенні сили натягування троса в електричний сигнал, який обробляється електронним блоком, з метою відображення на цифровому індикаторі сили тяги.

У силовому індикаторі (рис. 3) вимірюється сигнал із тензоперетворювачів і обчислюється сила тяги. Динамометр має цифрову індикацію сили (табло індикації) та світлодіодну індикацію режимів роботи (додаткові індикатори «НУЛЯ» і «ТАРИ»). Керування відбувається через кнопочку клавіатуру. Всією роботою електронного динамометра керує мікропроцесор за програмою, яка записана в постійно запам'ятовуючому пристрої (ПЗП). Налаштування зберігаються в ПЗП, що перепрограмується. Живлення силового індикатора здійснюється через мережеву вилку. Границя допустимої похибки приладу $\pm 5 \dots 10\%$.



Рис. 3. Загальний вигляд електронного динамометра ВН-1500-1 з інтерфейсом налаштування на ґрунтовому каналі в НУВГП

Загальний вигляд змонтованого зуба (ножа) на візку показаний на рисунку 4.



Рис. 4. Загальний вигляд змонтованого зуба на візку

Конструкція дозволяє безступінчато змінювати глибину різання в межах від 4,0 до 20 см, ступінчато змінювати кут різання – 20°, 30°, 40° і 50° (рис. 5, а–г), а також ширину лемеша – 2, 3, 4 і 5 см (рис. 6). Кут різання змінювався за рахунок гвинтового з'єднання зуба з лемешем. Зуб монтувався біля однієї з вертикальних стінок ґрунтового каналу.

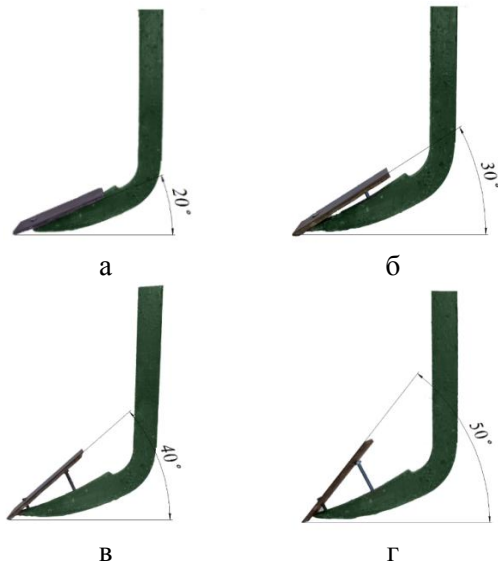


Рис. 5. Регулювання кута різання лемешів зуба



Рис. 6. Знімні лемеші

Критична глибина різання визначалася шляхом заміру бічних розширень у залежності від глибини в момент закінчення зростання бічних розширень прорізу ($B=B_{\max}=\text{const}$) за залежністю (рис. 7)

$$h_{\text{кр}} = \frac{(B_{\max} - b'_p) \text{tg} \gamma}{k_{\text{пер}}}, \quad (1)$$

де B_{\max} – максимальна ширина прорізу на денній поверхні; b'_p – ширина прорізу на критичній глибині різання (ширина крайніх

бокових різців); γ – кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту у проекції на фронтальну площину; $k_{\text{пер}}$ – перехідний коефіцієнт (рис. 7) ($k_{\text{пер}}=0,9\dots 0,95$).

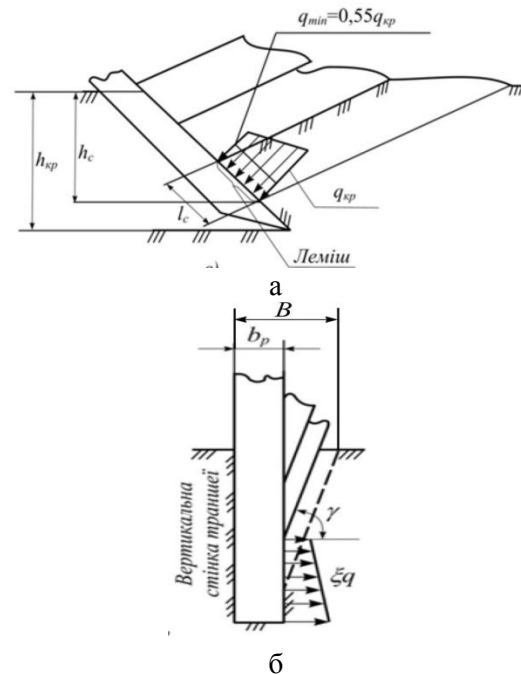


Рис. 7. Схема взаємодії різця із ґрунтом при асиметричному блокованому різанні: а – у поздовжній площині; б – у поперечній площині

Експериментальне визначення величини критичної глибини проводилося від поверхні до міста відділення стружки за допомогою лінійки (рис. 8).



Рис. 8. Заміри глибин та бічних розширень прорізів

Кут нахилу бічних стінок прорізу до горизонту у проекції на фронтальну площину для ґрунтових умов каналу НУВГП експериментально визначено у роботі [22]. Для блокового різання знаходиться в межах $\gamma = 57^\circ \dots 59^\circ$.

Для визначення довжини лемеша при блокованому різанні використовувалась методика, суть якої полягає у наступному. Оскільки в нашому випадку тензометричний ніж розробляє ґрунт на критичну глибину, то горизонтальна складова P_c опору переміщення досягає максимуму в момент відділення стружки від масиву (рис. 7). Тому можна припустити, що відстань τ_c між піками осцилограми визначає час t_c сколу ґрунтового елемента

$$\tau_c = \vartheta_g t_c, \quad (2)$$

де ϑ_g – швидкість руху візка.

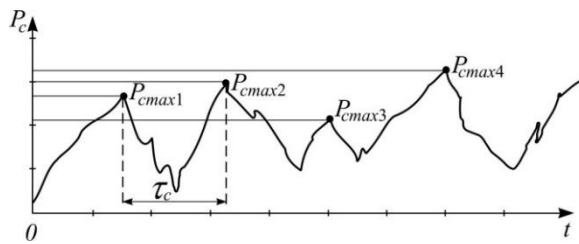


Рис. 9. Силова комп'ютерна діаграма

Враховуючи геометричні співвідношення між кутами різання α_p і сколу стружки ψ , довжина лемеша визначається:

$$l_L = \frac{\tau_c}{\sin \alpha_p (ctg \alpha_p + ctg \psi) k_{неп}} \quad (3)$$

Кут зсуву ψ визначений у роботі [22].

Для забезпечення заданої точності однофакторних експериментів повторність дослідів визначалася за методикою [22]

$$n = \frac{Z^2 V^2}{\varepsilon^2}, \quad (4)$$

де V – коефіцієнт варіації сили руйнування ґрунту землерийним робочим органом; ε – відносна помилка середньої арифметичної величини, що заміряється (задається в межах $\varepsilon = 0,05 \dots 0,1$ – для лабораторних досліджень); Z – функція, яка характеризує ймовірність попадання середньомаксимального значення сили руйнування в заданий довірчий інтер-

вал (коефіцієнт Стьюдента), визначається за таблицями значень інтеграла ймовірності відповідно із заданою надійністю для довірчої ймовірності 0,95 $Z=1,96$. Для визначених умов кількість повторювань експериментів було взято 4–5 разів.

Результати досліджень критичної глибини асиметричного блокованого різання крайніми боковими різцями

Дослідження проводилися у суглинистому ґрунті вологістю 10...20 %, зчеплення частинок ґрунту знаходилося у межах 0,04...0,06 МПа, а число ударів ударника ДорНДІ – 6...10.

Результати досліджень приведені в таблицях 1–4 і у вигляді графіків на рис. 10–14.

Таблиця 1 – Середні експериментальні значення ширини прорізу B (см) на денній поверхні при критично-глибинному різанні ($b'_p = 0,02$ м)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
h , см				
2	3,2	3,1	2,9	3,0
4	4,4	4,3	4,2	3,8
6	5,6	5,2	4,5	4,0
8	6,0	5,1	4,6	3,9
10	5,9	5,3	4,7	4,0
$h_{кр}$, см	6,6	5,4	4,5	3,2

Таблиця 2 – Середні експериментальні значення ширини прорізу B (см) на денній поверхні при критично-глибинному різанні ($b'_p = 0,03$ м)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
h , см				
4	5,4	5,3	5,2	5,2
6	6,6	6,5	6,2	6,0
8	8,0	7,9	7,0	6,1
10	8,8	8,0	6,8	5,9
12	8,7	7,9	7,0	6,2
$h_{кр}$, см	9,66	8,3	6,6	5,12

Таблиця 3 – Середні експериментальні значення ширини прорізу B (см) на денній поверхні при критично-глибинному різанні ($b'_p = 0,04$ м)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
h , см				
6	7,6	7,5	7,3	7,1
8	8,7	8,6	8,4	8,2
10	9,9	9,7	9,4	8,0
12	11,5	10,5	9,2	7,9
14	12,0	10,0	9,3	8,1
$h_{кр}$, см	13,02	10,5	8,9	6,8

Таблиця 4 – Середні експериментальні значення ширини прорізу B (см) на денній поверхні при критично-глибинному різанні ($b'_p = 0,05$ м)

α_p , град	20°	30°	40°	50°
h , см				
6	8,5	8,5	8,3	8,4
8	9,8	9,6	9,5	9,6
10	11,0	10,9	10,7	10,2
12	12,1	11,5	11,7	10,1
14	13,3	13,2	11,5	10,3
16	14,7	13,1	11,7	10,0
18	14,5	13,0	11,6	10,2
$h_{кр}$, см	16,1	13,6	11,1	8,7

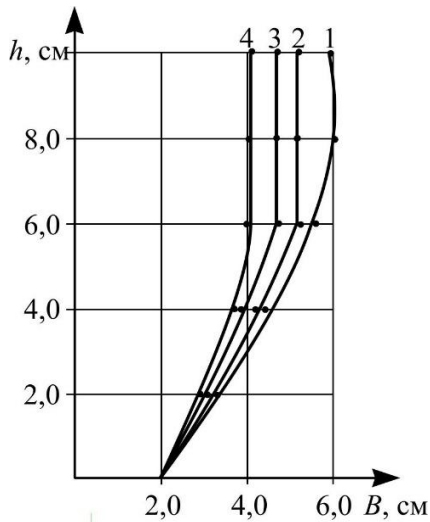


Рис. 10. Залежність ширини прорізу на денній поверхні від глибини різання ($b'_p = 0,02$ м): 1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

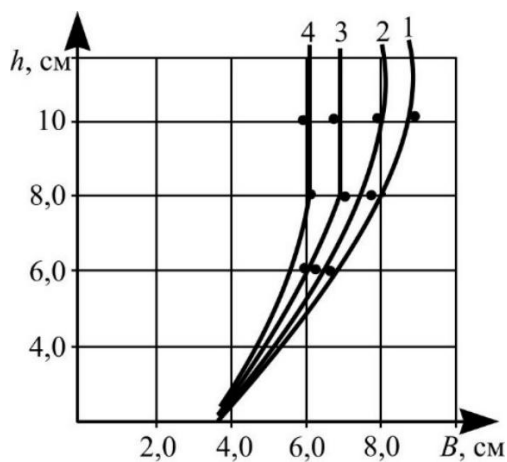


Рис. 11. Залежність ширини прорізу на денній поверхні від глибини різання ($b'_p = 0,03$ м): 1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

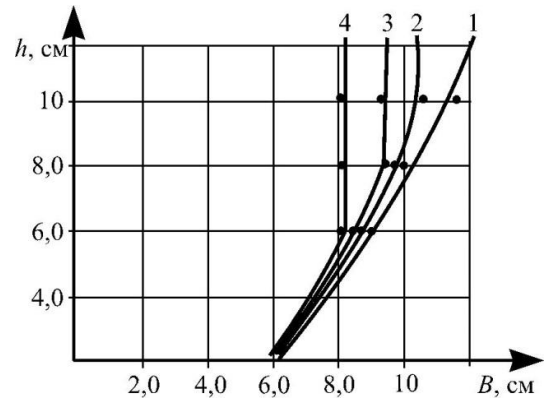


Рис. 12. Залежність ширини прорізу на денній поверхні від глибини різання ($b'_p = 0,04$ м): 1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

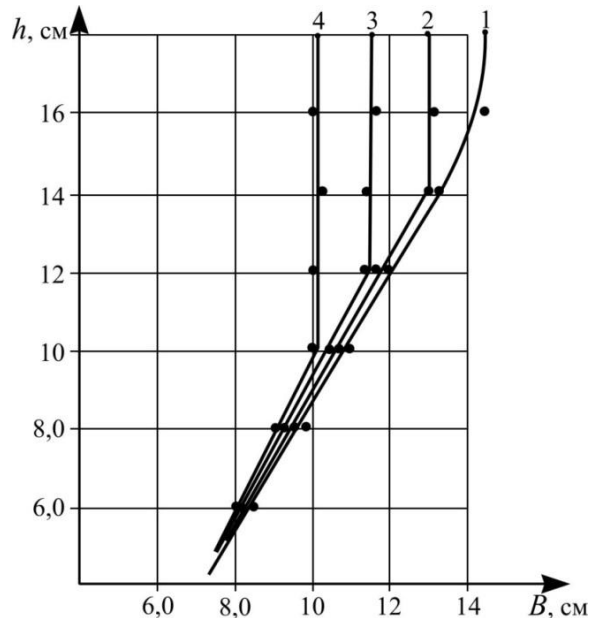


Рис. 13. Залежність ширини прорізу на денній поверхні від глибини різання ($b'_p = 0,05$ м): 1 – $\alpha_p = 20^\circ$; 2 – $\alpha_p = 30^\circ$; 3 – $\alpha_p = 40^\circ$; 4 – $\alpha_p = 50^\circ$

Із графіків видно, що за деякої глибини різання ширина прорізу на денній поверхні стабілізується та в разі подальшого заглиблення різця не змінюється. Ця ширина залежить від ширини різця та кута його різання. Для ширини різця: $b'_p = 0,02$ м в залежності від кута різання ширина прорізу B змінюється від 3,9...4,0 см до 5,9...6,0 см; для $b'_p = 0,03$ м – від 5,9...6,2 см до 8,7...8,8 см; для $b'_p = 0,04$ м – від 7,9...8,2 см до 11,5...12,0 см; для $b'_p = 0,05$ м – від 10,0...10,3 см до 14,5...14,7 см. При цьому відносна критична глибина

асиметричного блокованого різання зменшується зі збільшенням кута різання по лінійній залежності та знаходиться в межах: 1,69 для кута різання 50° та 3,25 для кута різання 20° (рис. 14). Розбіжність між експериментальними та теоретичними даними не перевищує 7,5 %.

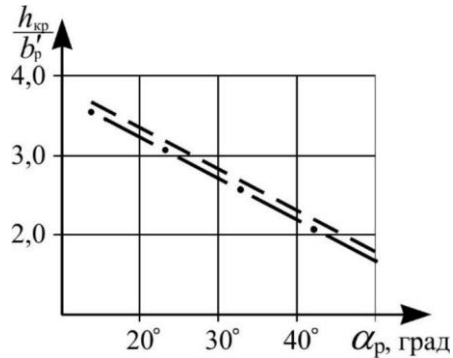


Рис. 14. Середні значення відносної критичної глибини різання крайніми боковими різцями: —●— експериментальна; - - - - - теоретична

Результати досліджень довжини лемеша крайніх бокових різців

Ґрунтові умови проведення дослідів є аналогічними умовам визначення критичної глибини різання. Швидкість переміщення візка в ході проведення експериментів дорівнювала $\vartheta_0 = 0,0625$ м/с (2,75 м/хв).

На рис. 15 приведено осцилограми різання ґрунту на критичну глибину 0,2 м в залежності від кута різання (20° , 30° , 40° і 50°) та ширини прорізу на критичній глибині різання (0,06 м; 0,07 м; 0,09 м; 0,11 м відповідно).

Щоб критична глибина різання 0,2 м була незмінною при зміні кута різання, ширина різців збільшувалася зі збільшенням кута різання: для $\alpha_p=20^\circ$, $b'_p=0,06$ м; для $\alpha_p=30^\circ$, $b'_p=0,07$ м; для $\alpha_p=40^\circ$, $b'_p=0,09$ м; для $\alpha_p=50^\circ$, $b'_p=0,11$ м.

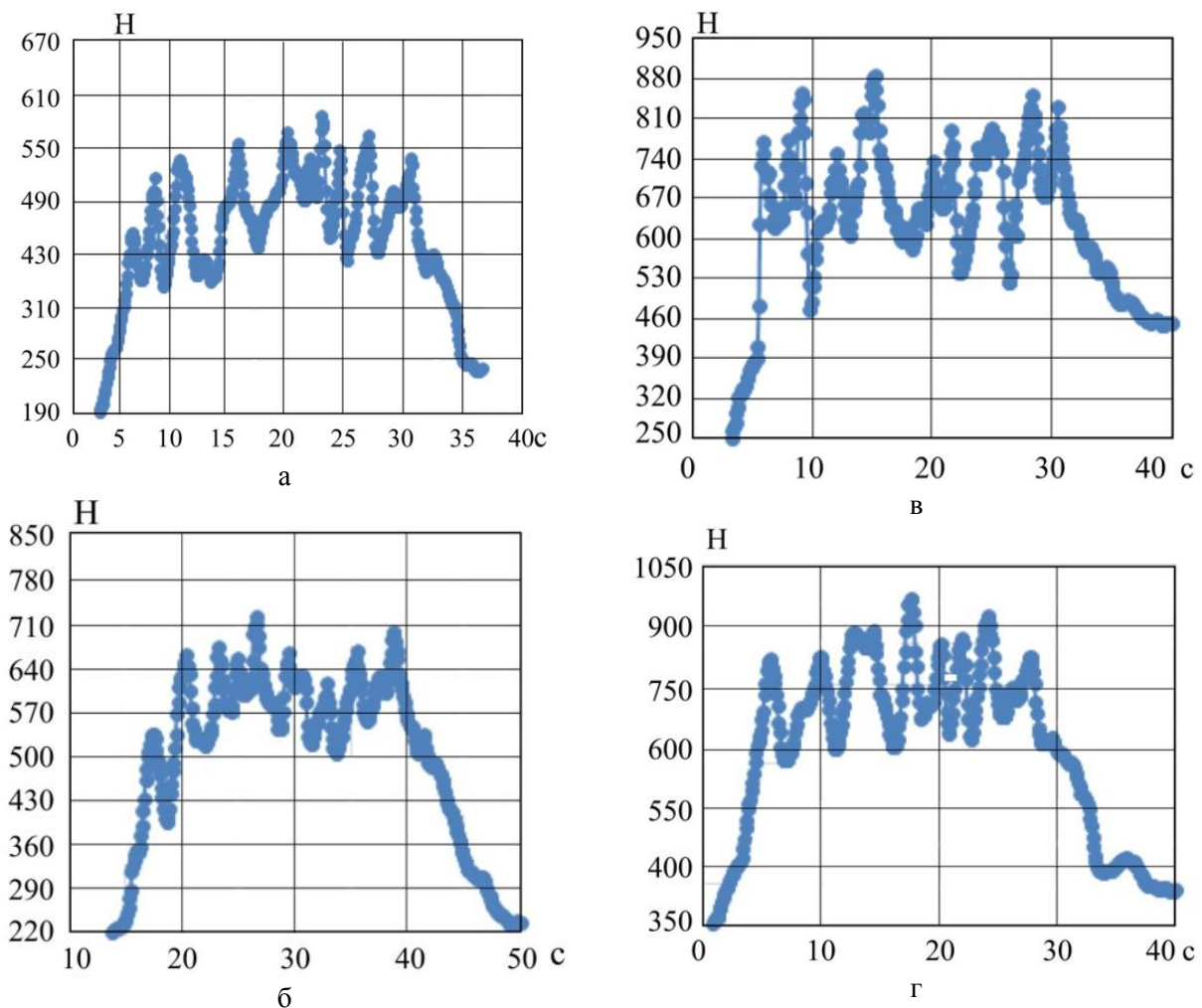


Рис. 15. Осцилограми асиметричного блокованого різання ґрунту на критичну глибину 0,2 м: а – $\alpha_p=20^\circ$, $b'_p=0,06$ м; б – $\alpha_p=30^\circ$, $b'_p=0,07$ м; в – $\alpha_p=40^\circ$, $b'_p=0,09$ м; г – $\alpha_p=50^\circ$, $b'_p=0,11$ м

За осцилограмами визначено середній час і крок сколювання ґрунту, які дорівнюють відповідно: для $\alpha_p=20^\circ$ – $t_{\text{сер}}=4,17$ с, $\tau_c=0,260$ м; для $\alpha_p=30^\circ$ – $t_{\text{сер}}=3,75$ с, $\tau_c=0,234$ м; для $\alpha_p=40^\circ$ – $t_{\text{сер}}=3,28$ с, $\tau_c=0,205$ м; для $\alpha_p=50^\circ$ – $t_{\text{сер}}=3,0$ с, $\tau_c=0,188$ м.

На рис. 16 приведено залежності відносної довжини лемеша від кута різання різця.

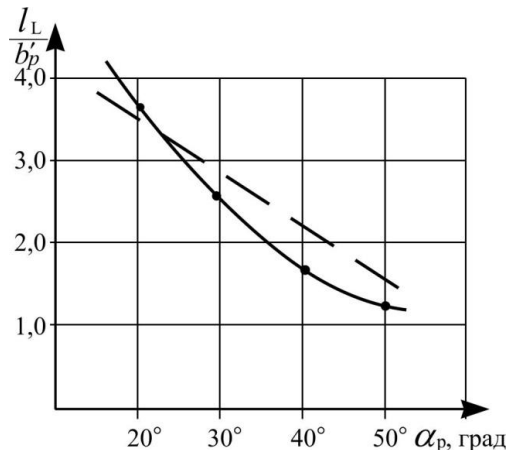


Рис. 16. Залежність відносної довжини лемеша від кута різання крайнього бокового різця —●— експериментальна; - - - - теоретична

Відносна довжина лемеша зменшується зі збільшенням кута різання від 20° до 50° від 3,68 до 1,24. Розбіжність між експериментальними та теоретичними даними пояснюється різними коефіцієнтами зчеплення ґрунту. Для теоретичних розрахунків коефіцієнт зчеплення було взято $c=0,04$ МПа, а в ході експериментів цей коефіцієнт змінювався у межах $c=0,04\dots0,06$ МПа.

Висновки

1. Розроблено методики визначення відносної критичної глибини асиметричного блокованого різання та відносної довжини лемеша на критичній глибині різання.

2. Установлено, що відносна критична глибина асиметричного блокованого різання зменшується за лінійною залежністю від 3,25 до 1,69 при збільшенні кута різання різця з 20° до 50° .

3. Установлено також, що відносна довжина лемеша на критичній глибині різання за збільшення кута різання від 20° до 50° зменшується від 3,68 до 1,24.

4. Результати експериментальних досліджень підтверджують достовірність математичних моделей і прийнятих допущень у розрахункових схемах.

Література

1. Шацкий А.С. О состоянии механизации трубопроводного строительства. Трубопроводный транспорт. М.: ОАО ВНИИСТ, №4. 2007. С. 10–14.
2. Rudnev V.K., Suponiyy V.N., Saenko N.V. at all. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells. Magazine of Civil Engineering. №2. 2015. С. 100–107. (Scopus, Web of Science)
3. Kravets S., Suponev V., Rieznikov O. at all. Determination of the resistance of the cylindrical-tubular drill for trenchless laying of underground communications. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. № 3/7(93). 2018. С. 64–71. (Scopus)
4. Volodymyr Suponyev, Olexander Posmituha, Svyatoslav Kravets, Volodymyr Suponyev and Kazimir Glavatsky1 Determination of equivalent and optimal sizes of wedge tip from flange for the static perforation of soil MATEC Web Conf. Volume 230, 2018. 7th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2018) <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823001011> (Scopus)
5. ESSO et le TCHAD. Mondialisationca Mode of access: URL: <http://www.internationalnews.fr/20-categorie-10189106.html>.
6. Chevron Pipe Line Company Mode of access: URL: www.chevron-pipeline.com. – Screen title.
7. The Natural Gas Pipeline Company of America Mode of access: URL: <http://www.frankkryder.com/assetmap.htm>. – Screen title.
8. Saudi Aramco – where energy is opportunity. Mode of access: URL: <http://www.saudiaramco.com/en/home.html>. – Screen title.
9. Trans-Arabian Pipeline Company Mode of access: URL: <http://almashriq.hiof.no/lebanon/300/380/388/tapline/>. – Screen title.
10. Vermeer Mode of access: URL: www2.vermeer.com/vermeer/EM/ru/Y/. – Screen title.
11. Trencor Introduces T14 Trencher Upgrade Mode of access: URL: <https://www.americanaugers.com/trencor-introduces-t14-trencher-upgrade/> – Screen title.
12. Cleveland Trencher Models Mode of access: URL: <http://www.cleveland-trencher.com>. – Screen title.
13. Sobolevskyi R., Korobiichuk V., Levytskyi V. Optimization of the process of efficiency manauement of the primary kaolin excavation on the curvea face of the concutioned area // Rudarsko-geolosko-naftni zbornik. Vol. 35. № 1 2020. p. 123–138. (Web of Science).

14. Palomba I., Richiedei D., Trevisani A. Estimation of the digging and payload forces in excavators by means of state observers // *Mechanical systems and signal processing*. Vol. 134. № 106356 2019. (Web of Science)
15. Moczko P., Pietrusiak D., Wieckowski J. Investigation of the failure of the bucket wheel excavator bridge conveyor // *Engineering failure analysis*. Vol. 106. № UNSP 104180. 2019. (Web of Science)
16. Xiujuan Yu, Xiaoping P., Zhihong Z. Lightweight and high-Strength design of an excavator bucket under uncertain loading // *Mathematical problems in engineering*. Vol. 2019. № 3190819. 2019. (Web of Science)
17. Мусійко В.Д., Коваль А.Б. Визначення силового навантаження базового шасі універсальної землерийної машини з віяльно-поступальною подачею її робочого обладнання на забій // *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Интенсификация рабочих процессов строительных и дорожных машин*. Дніпропетровськ: ПГСА, Вип. 79. 2014. С. 133–140.
18. Мусійко В.Д., Кравець С.В., Пухтаєвич О.І. Визначення раціональних режимів роботи інтенсифікатора розвантаження ґрунту з робочого органу землерийних машин безперервної дії. *Вісник Національного транспортного ун-ту*, №1(40), 2018, С. 241–251.
19. Кравець С.В., Косяк О.В., Гапонов О.О., Янчик Т.О. Визначення числа ліній різання та висоти ґрунтотранспортуючих скребоків ланцюгово-скребоквих траншейних екскаваторів У кн.: *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Інтенсифікація робочих процесів будівельних та дорожніх машин. Серія: Підйомно-транспортні, будівельні та дорожні машини і обладнання // Зб. наук. пр. № 107. Дніпро : ДВНЗ «ПДАБА», 2019. С. 66–74.*
20. Косяк О.В., Гапонов О.О., Пухтаєвич О.Г. Передумови створення критично-глибинних режимів роботи багатоскребоквих ланцюгових траншейних екскаваторів. – *Стр-во. Материаловедение. Машиностроение. Серія: Подъемно-трансп., строит., дор. машины и обор.*, Вип. 103, 2018, С. 145–151.
21. Kravets S. Determination of efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. Kravets S., Suponyev V., Goponov O., Kovalevskiy S., Koval A. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. № 4/1(16). 2020. P. 23–28.
22. Кравець С. В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій. (Основи теорії, проектування та створення) : навч. посібник для студ. спец. "Підйом.-трансп., буд., дор., меліор. машини і обладн.". Рівне : вид-во РДТУ, 1999. 278 с.

References

1. SHackij A.S. O sostoyanii mekhanizacii truboprovodnogo stroitel'stva *Truboprovodnij transport*. M.: OAO VNIIST, №4. 2007. S. 10–14. [in Russian].
2. Rudnev V.K., Suponiy V.N., Saenko N.V. at all. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells. *Magazine of Civil Engineering*. №2. 2015. S. 100–107. (Scopus, Web of Science)
3. Kravets S., Suponev V., Rieznikov O. at all. Determination of the resistance of the cylindrical-tubular drill for trenchless laying of underground communications. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij*. № 3/7(93). 2018. S. 64–71. (Scopus)
4. Volodymyr Suponyev. Determination of equivalent and optimal sizes of wedge tip from flange for the static perforation of soil Olexander Posmituha, Svyatoslav Kravets, Volodymyr Suponyev and Kazimir Glavatsky1 *MATEC Web Conf. Volume 230, 2018. 7th International Scientific Conference «Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings» (Transbud-2018)* <https://doi.org/10.1051/mateccnf/201823001011> (Scopus)
5. ESSO et le TCHAD. *Mondialisationca / Mode of access: URL: <http://www.internationalnews.fr/20-categorie-10189106.html>*. – Screen title.
6. Chevron Pipe Line Company / *Mode of access: URL: www.chevron-pipeline.com*. – Screen title.
7. The Natural Gas Pipeline Company of America / *Mode of access: URL: <http://www.frankkryder.com/assetmap.htm>*. – Screen title.
8. Saudi Aramco – where energy is opportunity / *Mode of access: URL: <http://www.saudiaramco.com/en/home.html>*. – Screen title.
9. Trans-Arabian Pipeline Company / *Mode of access: URL: <http://almashriq.hiof.no/lebanon/300/380/388/tapline/>*. – Screen title.
10. Vermeer / *Mode of access: URL: www2.vermeer.com/vermeer/EM/ru/Y/*. – Screen title.
11. Trencor Introduces T14 Trencher Upgrade / *Mode of access: URL: <https://www.americanaugers.com/trencor-introduces-t14-trencher-upgrade/>* – Screen title.
12. Cleveland Trencher / *Models Mode of access: URL: <http://www.cleveland-trencher.com>*. – Screen title.
13. Sobolevskiy R., Korobiichuk V., Levytskyi V. Optimization of the process of efficiency managment of the primary kaolin excavation on the curvea face of the concutioned area // *Rudarsko-geolosko-naftni zbornik*. Vol. 35. № 1 2020. p. 123-138. (Web of Science)
14. Palomba I., Richiedei D., Trevisani A. Estimation of the digging and payload forces in excavators

- by means of state observers // Mechanical systems and signal progressing. Vol. 134. № 106356. 2019. (Web of Science)
15. Moczko P., Pietrusiak D., Wieckowski J. Investigation of the failure of the bucket wheel excavator bridge conveyor // Engineering failure analysis. Vol. 106. № UNSP 104180. 2019. (Web of Science)
 16. Xiujuan Yu, Xiaoping P., Zhihong Z. Lightweight and high-Strength design of an excavator bucket under uncertain loading // Mathematical problems in engineering. Vol. 2019. № 3190819. 2019. (Web of Science)
 17. Musijko V.D., Koval' A.B. Vznachennya silovogo navantazhennya bazovogo shasi universal'noi zemlerijnoi mashini z viyal'no-postupal'noyu podacheju ii robochogo obladnannya na zabij // Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Intensifikaciya rabochih processov stroitel'nyh i dorozhnyh mashyn. Dnipropetrovs'k: PGSA, Vip. 2014. 79 S. 133–140. [in Ukraine].
 18. Musijko V.D., Kravec' S.V., Puhtaevich O.I. Vznachennya racional'nih rezhimiv roboti intensifikatora rozvantazhennya gruntu z robochogo organu zemlerijnih mashin bezperervnoi dii. Visnik Nacional'nogo transportnogo un-tu, №1(40), 2018, S. 241–251. [in Ukraine].
 19. Kravec' S.V., Kosyak O.V., Gaponov O.O., Yanchik T.O. Vznachennya chisla linij rizannya ta visoti gruntotransportuyuchih skrebkiv lancyugovo-skrebkovich transhejnih ekskavatoriv U kn.: Budivnictvo, materialoznavstvo, mashinobuduvannya. Intensifikaciya robochih procesiv budivel'nih ta dorozhnyh mashin. Seriya: Pidjomno-transportni, budivel'ni ta dorozhni mashini i obladnannya // Zb. nauk. pr. № 107. Dnipro : DVNZ «PDABA», 2019. S. 66–74. [in Ukraine].
 20. Kosyak O.V., Gaponov O.O., Puhtaevich O.G. Peredumovi stvorennya kritichnoglibinnih rezhimiv roboti bagatoskrebkovich lancyugovich transhejnih ekskavatoriv. Str-vo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Pod'omno-transp., stroit., dor. mashyny i obr., vyp. 103, 2018, S. 145–151. [in Ukraine].
 21. Kravets S., Suponyev V., Goponov O., Kovalevskiy S., Koval A. Determination of efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. Eastern-European journal of enterprise technologies. № 4/1(16). 2020. P. 23–28.
 22. Kravets S. V. Hruntozakhyshni ta enerhozberihaiuchi mashyny dlia prokladky pidzemnykh komunikatsii. (Osnovy teorii, proektuvannya ta stvorennia) : navch. posibnyk. dlia stud. spets. "Pidiom.-transp., bud., dor., melior. mashyny i obladn.". Rivne : vyd-vo RDTU, 1999. 278 S. [in Ukraine].

Кравець Святослав Володимирович¹, д.т.н., професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, s.v.kravets@nuwm.edu.ua тел. +38-097-28-915-89

Супонєв Володимир Миколайович², д.т.н., професор кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова, v-suponev@ukr.net, тел.: +38050-30-199-58,

Рагулін Віталій Миколайович², к.т.н., доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова, ragulinrvn@ukr.net, тел.: +38-050-545-80-70,

Щукін Олександр Вікторович², к.т.н., доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А.М. Холодова, alexhome88@gmail.com, тел.: +380979967641,

Гапонов Олексій Олександрович, аспірант, kaf_bdm@ukr.net тел.: +38099-13-984-32,

Дмитренко Олексій Антонович³, викладач kaf_bdm@ukr.net, тел.: +38095-421-26-14.

¹Національний університет водного господарства та природокористування, вул. Соборна, 11, м. Рівне, Україна, 33028.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, Україна, 61002.

³Харківський державний автомобільно-дорожній коледж, вул. Котельниківська, 3, м. Харків, 61000.

Experimental determination of the critical depth of cutting of blocked soil cutting by cutters and the length of the ploughshare of chain excavators

Abstract. Problem. The development of civil and industrial construction and the growing trend of construction of underground communications have led to an increase in the volume of work on the laying of gas and oil pipelines, water mains, sewerage systems, power cables and communication cables. Much of the excavation work in the construction of these communications is performed by trench excavators. **Goal.** Improving the processes of soil development by cutters in the conditions of critically deep soil cutting, which is aimed at reducing energy consumption for trench development and increasing the productivity of trench excavators is an urgent task. **Methodology.** Previous theoretical studies have determined the effective modes of operation of scraper excavators and established the size of its extreme side cutters and the conditions of its effective unloading, taking into account the laws of change of soil movement on the surface of unloading scrapers from the time of unloading. For the same purpose, the dependences of the blocked cutting speed on the trench width were determined and the technical productivity of the excavator was established on the basis of determining the bearing capacity of the soil by one group of cutters. It is established that the time of soil unloading from scrapers practically does not depend on their angular velocity within its change in the unloading zone. On this basis, the maximum

angular speed of the scrapers is determined. The determined indicators are related to the width of the extreme side cutters that perform asymmetric locked cutting. **Results. Originality.** The method of experimental researches and devices for realization of working processes of cutting of soils by cutters of chain excavators are considered in the work, namely: methods of definition of relative critical depth of asymmetric blocked cutting and relative length of a ploughshare on critical depth of cutting are developed. **Practical value.** It is established that the relative critical depth of asymmetric blocked cutting decreases linearly from 3.25 to 1.69 with increasing incisor cutting angle from 20 ° to 50 °. It was also found that the relative length of the ploughshare at the critical depth of cut with increasing cutting angle from 20 ° to 50 ° decreases from 3.68 to 1.24. The results of experimental studies confirm the reliability of mathematical models and accepted assumptions in the calculation schemes

Key words: trench digging, trench excavator, scraper excavator, scraper, cutter, critical depth, soil cutting, resistance force.

Svyatoslav Kravets¹, DSci (Engineering), Professor Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment,

s.v.kravets@nuwm.edu.ua, tel. +38-097-28-915-89,

Vladimir Suponyev², DSci (Engineering), Professor Department of Construction and Road-Building Machinery,

v-suponev@ukr.net, tel.: +38050-30-199-58,

Vitaliy Ragulin², PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery,

ragulinrvn@ukr.net, tel.: +38-050-545-80-70,

Oleksandr Shchukin², PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery,

alexhome88@gmail.com, tel.: +380979967641,

Aleksei Goponov² Postgraduate student,

kaf_bdm@ukr.net tel.: +38099-13-984-32,

Oleksii Dmytrenko³, Instr kaf_bdm@ukr.net

tel.: +38095-421-26-14

¹Kharkiv National Automobile and Highway University Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, Ukraine, 61002

²National University of Water and Environmental Engineering, Soborna str., 11, Rivne, Ukraine, 33028

³Kharkiv State Automobile and Highway College, Kotelnikovska str., 3, Kharkiv, 61000