

УДК 621.6;624.132;631.311;631.432;696.1 DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.99.0.84

ВПЛИВ КІНЕМАТИКИ РОБОЧОГО ОБЛАДНАННЯ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН НА ПРОЦЕС ГЛИБОКОГО ВІБРАЦІЙНОГО РІЗАННЯ ЗВ'ЯЗАНИХ ҐРУНТІВ

Супонєв В. М.¹, Рагулін В. М.¹, Ковалевський С. Г.¹, Орел О. В.¹,
Кравець С. В.², Нечидюк А. А.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет

²Національний університет водного господарства та природокористування

Анотація. У статті наведені результати досліджень впливу кінематики обладнання землерийних машин на процес вібраційного різання ґрунтів під час безтраншейного прокладання лінійно-протяжних підземних комунікацій та дренажних систем. Установлено значення шляху та швидкості переміщення ножового робочого органа в будь-який момент часу від частоти його коливання, амплітуди за умови фіксованих значень швидкості руху та визначено напрямок коливань залежно від співвідношення поступальної та вібраційної швидкостей. Аналіз впливу кінематики робочого обладнання на процеси глибокого різання ґрунтів дав змогу отримати умови ефективного використання вібраційного приводу, що спрямовано на зниження тяглового зусилля та зменшення енерговитрат на процес.

Ключові слова: різання ґрунтів, ножовий трубозаглиблювач, віброрізання ґрунтів, інтенсифікація процесів різання, лінійно-протяжні мережі, тяглові зусилля, землерийне робоче обладнання, інженерні комунікації.

Вступ

Збільшення обсягу робіт із безтраншейного прокладання трубопроводів газорозподільних мереж, енергетичних кабелів різних типів, дренажних систем, мереж водопостачання та водовідведення тощо. Ці роботи виконуються спеціальними землерийними машинами, в основі яких покладено утворення в ґрунті глибокої щілини ножовими робочими органами. Цей процес вимагає значних тяглових зусиль. Відомо, що для його зниження використовують різні способи інтенсифікації: вібрацію, змазування, транспортування, покриття антифрикційними матеріалами й под.

Одним з найефективніших методів є механічне коливання робочого обладнання за рахунок його кінематики.

Тому питання визначення впливу на процес інтенсифікації глибокого різання ґрунтів є важливим як з наукового, так і з практичного погляду.

Аналіз публікацій

Технологія безтраншейного прокладання підземних комунікацій широко впроваджена у виробництві та достатньо повно висвітлена в багатьох дослідженнях вітчизняних і зарубіжних авторів.

Питанням прокладання трубопроводів та інших видів інженерних комунікацій у різних умовах, зокрема гірській та заболоченій

місцевості відкритим способом та без відривання траншеї, запропоновані в роботах [1, 2]. У них розглянуті технології виконання дій, принципи підбору парку машин і механізмів для проведення землерийних робіт.

Удосконаленню процесу створення траншеї для лінійно-протяжних об'єктів наводяться в дослідженнях [3–5], які показали можливість підвищення продуктивності створення траншеї для прокладання інженерних комунікацій за рахунок використання менш енергоємних технологій розроблення ґрунту робочим обладнанням ланцюгових багатоскребкових екскаваторів безперервної дії.

З аналізу безтраншейних технологій для прокладання трубопроводів, кабелів та ліній зв'язку [6, 7] було встановлено розрахунки для визначення зусиль опору прокладанню комунікацій. З'ясовано, що для впровадження процесу необхідно створювати в ґрунті глибоку щілину. Для цього потрібно до ножового робочого органа додавати значні сили для подолання опору різання ґрунту.

Результати досліджень можливостей інтенсифікації розглянуто в низці наукових досліджень. Так, наприклад, у праці [8] описано використання газового змащення робочої поверхні обладнання повітряним тиском, зокрема за рахунок зниження сил тертя. Механічний вплив на руйнування ґрунту в цьому разі не розглядається.

У роботі [9] систематизовано основні відомості про сучасні види досліджень робочих процесів машин і методи їхньої інтенсифікації.

Динамічний вплив на роботу землерийних машин та безпосередньо на оператора розглядалися в працях [10, 11]. Але дію вібраційного походження від спеціально створеного коливального процесу за рахунок кінематики робочого органа навантаження не були розглянуті.

Процес інтенсифікації глибокого різання ґрунту в процесі безтраншейного прокладання дренажних систем для меліорації було досліджено в роботах [12, 13, 16, 17]. Зниження опору різання ґрунту досягається за рахунок збільшення критичної глибини різання ґрунту багатоярусним ножом та за умови глибини різання до 1,2 м і становить 40%. Але це не звільняє від необхідності використання додаткового тягача, що вимагає пошуку інших шляхів інтенсифікації робочого процесу.

Мета та постановка завдання

Метою дослідження є розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо зниження опору глибокого різання ґрунту ножовим робочим органом за рахунок його вібраційно-коливальних рухів. Для її досягнення необхідно визначити вплив кінематики обладнання землерийних машин на процес вібраційного різання ґрунтів, установити значення шляху й швидкості переміщення ножового робочого органа в будь-який момент часу t від частоти його коливання, амплітуди за умови фіксованих значень швидкості руху та з'ясувати напрямок коливань залежно від співвідношення поступальної та вібраційної швидкостей.

Попереднє обґрунтування вирішення завдання

Як відомо, загальний опір ґрунтів глибокому різанню містить такі складники:

- силу тяжіння вирізаного ґрунту;
- зовнішнє та внутрішнє тертя;
- опір відділенню ґрунту від масиву.

Зниження впливу тих або інших складників можливе різними способами, найефективнішими з яких є використання вібрації робочих органів. Такі теоретичні й експериментальні дослідження щодо застосування ефекту вібрації для зменшення зусиль різання проводилися в КІБІ під керівництвом проф. В.Л. Баладінського [9]. Установлені залежності впливу на ефективність зниження тяго-

вого зусилля таких чинників, як швидкість різання, амплітуда, частота коливань тощо.

Крім того, виявлено зростання ефекту використання від частоти коливального процесу і зниження цього впливу під час збільшення швидкості різання. Наголошується, що максимальний ступінь зниження зусилля копання може досягати 90 % у лабораторних умовах проведення експериментів, що говорить про високу ефективність цього способу інтенсифікації робочого процесу.

Застосування віброударних коливань вертикального ножа за умови глибини копання до 2 м для натурних робочих органів дають ще вищий ефект (60–95 %), тоді як тільки вібраційний режим коливань дає змогу понизити тягове зусилля машини тільки на 35–48 %.

Детальніше дослідження впливу вібрації на процес різання вертикальними плоскими ножами кабелеукладачів було проведене Ф.А. Діановим [14]. Віброуючі ножі здійснювали як вертикальні або подовжні коливання, так і складніші – циркуляційні (тобто одночасне переміщення кромки ножа в поздовжній і поперечній площині). Під час експериментальних досліджень установлено, що застосування вібрації дає змогу понизити тягове зусилля, якщо коливання становлять:

- вертикальні – до 2,22 раза;
- поздовжні – до 8,83 раза;
- циркуляційні – до 11,5 раза.

Окрім того, ефект вібрації у всіх розглянутих випадках збільшується з підвищення частоти й амплітуди вимушених коливань. Загальна енергоємність щілеутворення вертикальним ножом, на думку автора, дещо перевищує енергоємність статичного різання ґрунту.

Аналогічні дослідження проводилися і в ХНАДУ під керівництвом проф. В.К. Руднева [8, 9]. Експерименти з дослідження копання ґрунту ножовим робочим органом, обладнаним вібраційною плитою, мали мету виявити вплив основних вібраційних параметрів на процеси копання ґрунту плоским широким ножом насамперед на опір копання та тягову потужність.

Оброблення методами математичної статистики експериментальних результатів дозволила набути оптимальних значень досліджуваних чинників:

$$\text{за тяговою потужністю } \frac{nS}{\nu} = 888;$$

$$\text{за сумарною потужністю } \frac{nS}{\nu} = 465,$$

де n – число обертів вібродвигуна, об./хв; S – амплітуда коливань плити, м; v – швидкість руху робочого органа в горизонтальній проекції, м/с.

Зворотно-поступальна хода плити впливає на відділену стружку ґрунту, яка потрапляє, наприклад, усередину ковша скрепера. Це спричиняє зниження сил тертя ґрунту з ґрунтом, що й зумовлює можливість зменшення тягового зусилля в кінці фази наповнення на 25 %.

Одночасно знижуються динамічні навантаження на тягово-зчіпний пристрій, подрібнюються елементи сколювання ґрунту, що надходить у ківш, і, відповідно, збільшує загальну масу наповнення ґрунту в робочому органі ковшового типу (приблизно на 10 %); знижується буксування машини.

Водночас виявлено, що робота вібраційного пристрою під час копання піщаних ґрунтів не дасть такого помітного ефекту, як у розробленні малозв'язаних ґрунтів, що має своє логічне пояснення.

Як впливає з проведеного аналізу виконаних досліджень і відповідних конструкторських рішень у сфері можливого використання ефекту вібрації для інтенсифікації робочих процесів надкритичного різання ґрунту, цей спосіб дає змогу істотно понизити величину опору різанню ґрунту (горизонтальний складник). Проте енергоємність процесу в цьому разі істотно збільшується порівняно з традиційними способами дії на ґрунт (пасивне статичне руйнування), що особливо помітно на великих швидкостях різання, й істотно ускладнює конструкції робочого устаткування землерийної машини. Водночас вібраційне коливання високої частоти знижують утомну міцність, витривалість металоконструкцій навісного робочого устаткування; частково передані вібраційні коливання на машину загалом можуть спричинити вібраційні захворювання оператора. Крім того, можливе й додаткове порушення структури ґрунту в зоні ущільнення, що в деяких випадках пов'язано з негативним впливом, наприклад, водозбору в дренажних системах меліоративних мереж.

Ураховуючи вищевикладене, необхідно зазначити, що вплив вібрації в процесі різання ґрунту робочим органом багатоярусного типу також може мати істотне значення, що вимагає відповідного теоретичного й експериментального опрацювання цього питання.

Установлення впливу кінематики робочого обладнання ножових машин на процес глибокого віброрізання малозв'язаних ґрунтів

Якщо позначити частоту коливань – ω , амплітуду – S , то за умови фіксованих значень швидкості руху робочого органа в горизонтальній площині можна записати значення шляху та швидкості переміщення різальної кромки в будь-який момент часу t :

$$x = vt \mp S \cdot \sin \omega t, \quad (1)$$

$$\dot{x} = v \mp S\omega \cdot \cos \omega t. \quad (2)$$

Для визначеного напрямку коливань залежно від співвідношення поступальної v та вібраційної $S\omega$ швидкостей можуть бути два характерні випадки взаємодії робочого органа з ґрунтом.

Перший: $\frac{v}{S\omega} > 1$, тоді x буде завжди позитивна, а значення переміщення в будь-який момент часу матиме градієнт приросту. Тобто процес різання нагадуватиме «продавлювання» штампу змінним зусиллям з деяким періодом часу. Графічне зображення першого випадку наведено на рис. 1.

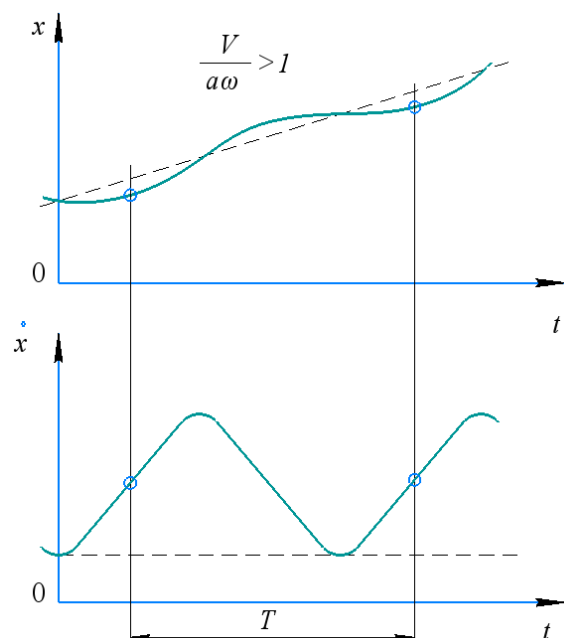


Рис. 1. Вигляд графіка шляху та швидкості ножа за умови: $\frac{v}{S\omega} > 1$

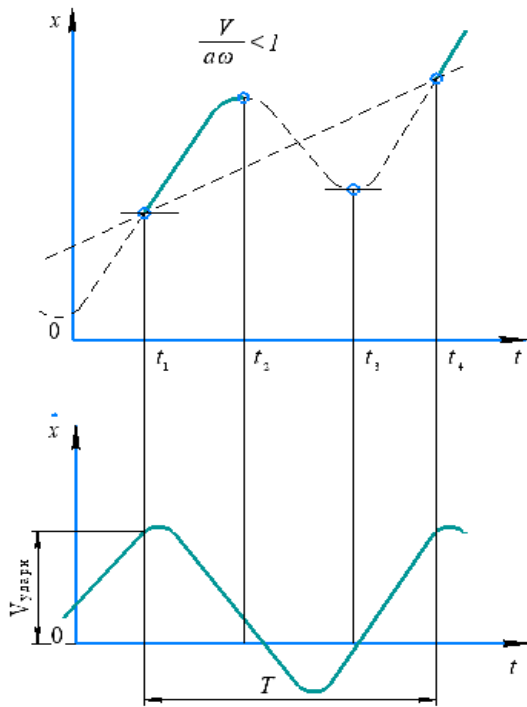


Рис. 2. Вигляд графіка шляху та швидкості ножа за умови: $\frac{v}{S\omega} < 1$

Крім того, необхідно звернути увагу на той факт, що максимальне значення сили в момент удару досягається в разі найбільшого значення швидкості ножа в момент «досягнення» ґрунту, що має відповідати єдиному значенню швидкості руху машини в процесі фіксованої вібрації.

Цей факт установлений багатьма дослідженнями, оптимальність значення відношення $\frac{v}{S\omega}$ досягається за умови його абсолютних величин менших за одиницю (випадає 2), тобто в разі малих поступальних швидкостей руху машини.

Зниження поступальної швидкості одночасно зменшує і статичну потужність різання ($P_{cm} \cdot v$), що може вплинути на сумарну енергоємність процесу загалом з урахуванням витрат потужності на вібропривод.

Для аналітичного дослідження останнього висновку скористаємося відомими показниками ефективності за зусиллям різання:

$$\delta^P = \frac{P_{cm} - P_{виб}}{P_{cm}}, \quad (3)$$

де P_{cm} і $P_{виб}$ – відповідно зусилля різання за умови невіброуючого та віброуючого ножа.

Енерговитрати під час віборізання можна оцінити аналогічним показником:

$$\delta^N = \frac{N_{виб} + N_M}{N_{cm}}, \quad (4)$$

де $N_{cm} = P_{cm} \cdot v$ – потужність тягача в разі традиційного статичного різання ґрунту; $N_{виб} = P_{виб} \cdot v$ – потужність тягача за умови віборізання ґрунту; N_M – потужність приводу вібратора (вібромашини).

Підставляючи вирази в загальну формулу, отримаємо:

$$\begin{aligned} \delta^N &= \frac{P_{cm} \cdot v - (P_{виб} \cdot v + N_M)}{P_{cm} \cdot v} = \\ &= \frac{P_{cm} - P_{виб}}{P_{cm}} - \frac{N_M}{P_{cm} \cdot v} = \delta^P - \frac{N_M}{P_{cm} \cdot v}. \end{aligned} \quad (5)$$

Якщо вираз $\frac{N_M}{P_{cm} \cdot v}$ позначити як δ^B , то залежність (5) матиме завершений вигляд:

$$\delta^N = \delta^P - \delta^B. \quad (6)$$

Остання різниця говорить про те, що результуюча енергоємність (позитивна) залежатиме не від ступеня зниження зусилля різання, а від співвідношення впливу швидкості руху машини на обидва показники (δ^P і δ^B) одночасно.

Якісно графік впливу цих залежностей на результуючу величину можна подати в такому вигляді (рис. 3, а).

Як видно з рис. 3, б, величина результуючого показника далеко не завжди матиме позитивне значення (заштрихована зона).

Залежно від характеру кривих δ^P і δ^B (дивись пунктир на рис. 3, а) їхнє сумарне значення буде практично завжди в негативній ділянці, а в зоні малих значень швидкості v ця вірогідність ще більше збільшиться. Це говорить про зростання загальної енергоємності процесу вібраційного різання ґрунту за умови горизонтального напрямку вектора вібраційної швидкості. Навіть у разі позитивної різниці складників максимум ефекту буде за умови абсолютно інших значень швидкості руху машини, що вимагає пошуку нового оптимуму за різними критеріями.

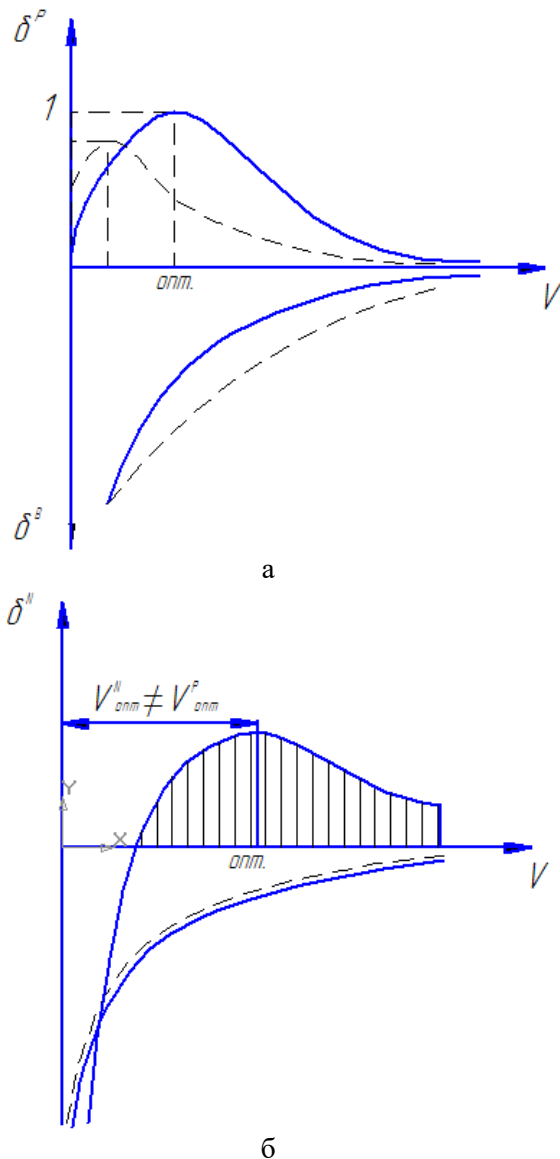


Рис. 3. Енергетична ефективність вібраційного різання ґрунту: а – складники; б – результуючі

Аналіз результатів щодо визначення впливу кінематики робочого обладнання ножових машин на процес різання ґрунтів

Різання робочими органами в процесі накладання коливань у поперечній площині також дає істотний ефект зниження зусилля різання. І хоча глибоких аналітичних досліджень цей процес не отримав, все ж таки доцент ХНАДУ В.А. Горбуненко провів ще 1960 р. експериментальні роботи [15], які довели можливість збільшення глибини копання плоским ножом в 1,5–2,0 рази за умови поперечного «пиляння» зв'язаного ґрунту.

Пояснення цих результатів автор бачить у відсутності на різальних елементах зон ущільнення, які руйнуються під час синусоїдального переміщення різальної кромки ножа. Це призводить до зниження зусилля різання,

енергоємності процесу, з переважанням руйнування зрушення або вигину замість стискування в разі традиційного пасивного різання.

До цього необхідно додати, що рух різальної кромки по синусоїді зрештою аналогічний копанню ґрунту похило встановленим ножом. А в останньому випадку, як відомо з теорії різання, питомий опір ґрунту K_{KOC} дещо нижчий, ніж за умови будь-якого блокованого різання ґрунту.

Попередні дослідження щодо оптимізації вертикальної та горизонтальної складників вібраційного різання показали, що в процесі еліптичних коливань ножа у вертикальній площині можливе зниження сили різання до 70 %. Із збільшенням швидкості різання до $0,1 \div 0,5$ м/с цей показник падає до 10 %, що підтверджується низкою досліджень.

Зазначене вище дає змогу отримати попередні висновки з підвищення ефективності робочих процесів землерийних машин за рахунок кінематики руху робочих органів та їхньої вібрації. Але повноцінної відповіді щодо якісної оцінки щодо зниження енерговитрат за умови глибокого різання ґрунту ці дослідження не дали. Отже, необхідний їхній подальший розвиток з урахуванням особливостей цього процесу взаємодії з ґрунтом.

Висновки

Після проведених досліджень про вплив кінематики робочого обладнання ножових машин на процес різання ґрунтів були отримані такі результати.

На основі встановленого значення шляху та швидкості переміщення ножового робочого органа в будь-який момент часу від частоти його коливання, амплітуди за умови фіксованих значень швидкості руху визначено напрям коливань залежно від співвідношення поступальної та вібраційної швидкостей, для яких було розглянуто два характерних випадки.

У першому випадку рух ножового робочого органа буде завжди поступальним і процес нагадуватиме «продавлювання» штампю із змінним зусиллям у деякому періоді часу.

У другому – рух обладнання на деяких відрізках часу значення переміщення кромки можуть стати зворотними щодо напрямку руху машини. Тобто процес різання в цьому випадку подібний до «рубки» з частотою ударів, рівній частоті коливань ножа.

В аналітичному дослідженні за відомими показниками ефективності процесу різання ґрунтів встановлено, що зниження поступальної швидкості одночасно зменшує і статичну потужність різання, що може вплинути на сумарну енергоємність процесу загалом з урахуванням витрат потужності на привод механізму вібрації.

Література

1. Ткачук М. М., Филипчук В. Л., Якимчук Б. Н. Будівництво зовнішніх мереж і монтаж санітарно-технічного обладнання будівель: навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2013. 391 с.
2. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells / V. K. Rudnev at all. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No. 2. P. 100–107.
3. Kravets S., Suponyev V., Goponov A., Kovalevskiy S., Koval A. Determination efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2020. № 4/1(16). С. 23–28.
4. Косяк О. В., Гапонов О. О., Пухтаевич О. Г. Передумови створення критичноглибинних режимів роботи багатоскребоквих ланцюгових траншейних екскаваторів. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Подъемно-транспортные, строительные, дорожные машины и оборудование*. 2018. Вып. 103. С. 145–151.
5. 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, 2014. Вып. 79. С. 133–139.
6. Кравец С. В., Руднев В. К., Каслин Н. Д., Супонев В. Н. Машины для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций: учебное пособие. Харьков: Фавор, 2008. 256 с.
7. Кравец С. В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини (Основи теорії, проектування та створення). Рівне: РДТУ, 1999. 277с.
8. Руднев В. К. Копание ґрунтов землеройно-транспортными машинами активного действия. Харьков: Вища школа, 1974. 144 с.
9. Хачатурян С. Л., Руднев В. К. Эффективность использования газового змещения при проколуванні ґрунту. *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит: общегосударственный научно-производственный и информационный журнал*. 2013. № 2 (108). С. 2–6.
10. Баловнев В. И., Хмара Л. А. Интенсификация разработки ґрунтов в дорожном строительстве. Москва: Транспорт, 1993. 383 с.

11. Геллер Ю. А. Энергосберегающий класс машин, работающих по принципу замыкания динамических нагрузок на рыхлительном оборудовании. *Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: сборник статей IX Международной конференции* Москва: Котону [Бенин], 2010. С. 257–259.
12. Кравец С. В., Кованько В. В., Лук'янчук О. П. Наукові основи створення землерийно-ярусних машин і підземно рухомих пристроїв: монографія. Рівне: НУВГП, 2015. 319 с.
13. Критичноглибинні двоярусні ґрунторозпушувачі: монографія / С. В. Кравец та ін.; за заг. ред. С. В. Кравця. Рівне: НУВГП, 2018. 235 с.
14. Дианов Ф. А. Исследование процесса вибрационного разрезания ґрунтов с циркуляционным движением: диссертация кандидата наук: 05.05.04. Москва, 1981. 210 с.
15. Горбуненко В. А. Влияние кинематики рабочего органа на процесс рабочего органа виборезания связанных ґрунтов. *Труды Харьковского автомобильно-дорожного института*. 1960. Вып. 22. С. 125–129.
16. Експериментальне визначення критичної глибини блокованого різання ґрунтів різцями та довжини лемеша ланцюгових екскаваторів / С. В. Кравец та ін. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожного університету*. 2021. Вып. 95. С. 43–53.
17. Measuring the soil compaction zone and pressure of deformed soil on underground objects with an asymmetric cylindrical TIP / V. Suponyev at all. *Automobile Transport*. 2021. Vol. 48. P. 93–100.

References

1. Tkachuk M.M., Filipchuk V.L., Yakimchuk B.N. Budivnictvo zovnishnih merezh i montazh sanitarno-tekhnichnogo obladnannya budivel': Navchal'nij. posibnik. Rivne: NUVGP, 2013. 391 s. [in Ukrainian]
2. Rudnev V. K., Suponiyv V. N., Saenko N. V. at all. Soil thrust boring plant of static action with ring spacers of horizontal wells. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No. 2. P. 100–107.
3. Kravets S., Suponyev V., Goponov A., Kovalevskiy S., Koval A. Determination efficient operating modes and sizes of blades for multi-scraper trench excavators. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovyh tekhnologij*. 2020. No. 4/1 (16). S. 23–28.
4. Kosyak O. V., Gaponov O. O., Puhtaevich O. G. Peredumovi stvorenniya kritichnoglibinnih rezhimiv roboti bagatoskrebkovih lancyugovih transhejnih ekskavatoriv. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Seriya: Pod'omno-transp., stroit., dor. mashiny i obor.* 2018. Vyp. 103. S. 145–151. [in Ukrainian]
5. Musijko V. D., Koval' A. B. Vznachennya silovogo navantazhennya bazovogo shasi universal'noi zemlerijnoi mashini z viyal'no-postupal'noyu podacheyu ii robochogo

- obladnannya na zabij. *Stroitel'stvo. Materialovedenie. Mashinostroenie. Intensifikaciya rabochnih processov stroitel'nyh i dorozhnyh mashyn.* Dnipropetrovs'k: PGSA, 2014. Vyp. 79. S. 133–139. [in Ukrainian]
6. Kravec S. V., Rudnev V. K., Kaslin N. D., Suponev V. N. *Mashiny dlya bestranshejnoj prokladki podzemnyh kommunikacij: uchebnoe posobie.* Khar'kov: Favor, 2008. 256 s. [in Russian]
 7. Kravec' S. V. *Gruntozahisni ta energozberigayuchi mashini (Osnovi teorii, proektuvannya ta stvorennja).* Rivne: RDTU, 1999. 277 s. [in Ukrainian]
 8. Rudnev V. K. *Kopanie gruntov zemlerojno-transportnymi mashinami aktivnogo dejstviya.* Khar'kiv: Vishcha shkola, 1974. 144 s. [in Russian]
 9. Hachaturyan S. L., Rudnev V. K. *Efektivnist' vikoristannya gazovogo zma-shchennja pri prokolyuvanni runtu. Energoberezhenie, energetika, energoaudit: obshchegosudarstvennyj nauchno-proizvodstvennyj i informacionnyj zhurnal.* 2013. No. 2 (108). S. 2–6. [in Ukrainian]
 10. Balovnev V. I., Hmara L. A. *Intensifikaciya razrabotki gruntov v dorozhnom stroitel'stve.* Moskva: Transport, 1993. 383 s. [in Russian]
 11. Geller Yu. A. *Energoberegayushchij klass mashin, robotayushchih po principu zamykaniya dinamicheskikh nagruzok na ryhlitel'nom oborudovanii. Resursovosproizvodyashchie, malo-othodnye i prirodohrannye tekhnologii osvoeniya nedr: sb. st. IX Mezhdunar. konf.* Moskva: Kotonu [Benin], 2010. S. 257–259. [in Russian]
 12. Kravec' S. V., Kovan'ko V. V., Luk'yanchuk O. P. *Naukovi osnovi stvorennja zemlerijno-yarusnih mashin i pidzemno ruhomih pristrojiv: monografiya.* Rivne: NUVGP, 2015. 319 s. [in Ukrainian]
 13. Kravec' S. V., Skoblyuk M. P., Stin'o O. V., Zorya R. V. *Kritichnogliinni dvojarusni gruntorozpushuvachi: monografiya / za zagal'noyu redakciyu S. V. Kravcya.* Rivne: NUVGP, 2018. 235 s. [in Ukrainian]
 14. Dianov F. A. *Isslndovanie processa vibracionnogo razrezaniya gruntov s cirkulyacionnym dvizheniem: dissertaciya kandidata nauk: 05.05.04.* Moskva, 1981. 210 s. [in Russian]
 15. Gorbunenko V. A. *Vliyaniye kinematiki rabocheho organa na protsess rabocheho organa vibrozrezaniya zvyazannykh gruntov. Trudy Kharkovskogo avtomobilno-dorozhnoho instituta.* 1960. Vyp. 22. S. 125–129. [in Russian]
 16. Kravets S. V., Suponiev V. M., Haponov O. O., Ragulin V. M., Shchukin O. V., Dmytrenko O. A. *Eksperymentalne vyznachennia krytychnoi hlybyny blokovanoho rizannia gruntiv riztsiamy ta dovzhyny lemeshha lantsiuhovykh ekskavatoriv. Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu.* 2021. Vyp. 95. S. 43–53. [in Ukrainian]
 17. Suponyev V., Fidrovska N., Balesnyi S., Ragulin V., Kravets S. *Measuring the soil compaction zone and pressure of deformed soil on underground objects with an asymmetric cylindrical TIP.* *Automobile Transport.* 2021. Vol. 48. P. 93–100.
- Супонєв Володимир Миколайович**, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, v-suponev@ukr.net, тел.: +38050-30-199-58;
- Рагулін Віталій Миколайович**, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, ragulinrvn@ukr.net, тел.: +38-050-545-80-70;
- Ковалевський Сергій Германович**, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2407180@ukr.net, тел.: +38097-24-071-80;
- Орел Олександр Володимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних і дорожніх машин ім. А. М. Холодова, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, oav1980@gmail.com, тел.: +380(67) 701-98-64;
- Кравець Святослав Володимирович**, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування, s.v.kravets@nuwm.edu.ua, тел.: +38-097-28-915-89;
- Нечидюк Анатолій Анатолійович**, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин і обладнання, Національний університет водного господарства та природокористування, a.a.nechydiuk@nuwm.edu.ua; тел.: +38067-7580884.
- The influence of the kinematics of the working equipment of earthmoving machines on the process of deep vibratory cutting of bound soils**
Abstract. Problem. *The article presents the results of studies of the impact of kinematics of earthmoving equipment on the process of vibratory soil cutting during trenchless laying of linear underground communications and drainage systems. From the conducted review, it was established that the basis of the technology is the formation of a narrow gap in the soil with the help of a knife working body. This process requires significant energy costs and traction efforts. The task of reducing them is important and urgent, both from a scientific point of view and from a practical position. Goal.* *The purpose of the study is to develop scientifically based recommendations on reducing the resistance of deep cutting of the soil by the knife working body due to its vibrational and oscillatory movements. Methodology.* *Theoretical studies are based on ideas about the theory of soil mechanics, the theory of mechanisms and machines,*

and the influence of vibration on work processes. **Results.** Based on the established value of the path and speed of movement of the knife working body at any moment of time from its oscillation frequency, amplitude at fixed values of the movement speed, the direction of oscillations is determined depending on the ratio of translational and vibrational speeds, for which two typical cases were considered. In the first case, the movement of the knife working body will always be translational and the process will resemble the "pressing" of a stamp with variable effort in a certain period of time. During the second movement of the equipment, in some time segments, the values of the movement of the edge may become the reverse, in the direction of the movement of the machine. That is, the cutting process in this case is similar to "chopping" with a frequency of blows equal to the frequency of the knife's oscillations.

Analytical research on the known indicators of the soil cutting process efficiency found that a decrease in the translational speed simultaneously reduces the static cutting power, which can affect the total energy consumption of the process as a whole, taking into account the power consumption of the vibration mechanism drive. **Practical meaning.** The analysis of the influence of the kinematics of the working equipment on the processes of deep cutting of soil made it possible to obtain the conditions for the effective use of the vibration drive, which is aimed at reducing the traction force and the energy consumption of the process.

Key words: soil cutting, knife pipe deepening, vibrating soil cutting, intensification of cutting

processes, linear extension networks, traction forces, earthmoving equipment, engineering communications.

Suponev Vladimir, DSci (Engineering), Professor Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University, v-suponev@ukr.net, tel.: +38050-30-199-58;

Ragulin Vitaliy, PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University, ragulinrvn@ukr.net, tel.: +38-050-545-80-70;

Kovalevskiy Serhii, PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University, 2407180@ukr.net, tel.: +38097-24-071-80;

Orel Oleksandr, PhD, Assoc. Prof. Department of Construction and Road-Building Machinery, Kharkiv National Automobile and Highway University oav1980@gmail.com, tel.: +380677019864;

Kravets Svyatoslav, DSci (Engineering), Professor Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment, National University of Water and Environmental Engineering s.v.kravets@nuwm.edu.ua, tel.: +38-097-28-915-89;

Nechydiuk Anatolii, PhD, Assoc. Prof. Department of building, road, melioration, agricultural machinery and equipment, National University of Water and Environmental Engineering, a.a.nechydiuk@nuwm.edu.ua; tel.: +38067-7580884.
