

## Землерийні, дорожні та меліоративні машини

УДК 624.132.3

М.К. Сукач, д.т.н., проф.;  
С.І. Лусак, аспірант (КНУБА, Київ)

### АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ГРУНТУ ТРАНШЕЙНОЮ МАШИНОЮ

*АННОТАЦІЯ.* Досліджено аналітичні моделі різання ґрунту робочими органами землерийних машин. Розглянуто механізм взаємодії факторів, що впливають на процес роботи машини для розкривання підземних трубопроводів.

*Ключові слова:* землерийна машина, математична модель, ґрунт, ріжучий інструмент.

*АННОТАЦИЯ.* Исследованы аналитические модели резания ґрунта рабочими органами землеройных машин. Рассмотрен механизм взаимодействия факторов, которые влияют на процесс работы машины для раскрытия подземных трубопроводов.

*Ключевые слова:* землеройная машина, математическая модель, ґрунт, режущий инструмент.

*SUMMARY.* The analytical models of cutting with of soil the workings organs of earth movers are investigation. The mechanism of co-operation of factors which influence on the process of work of machine for opening of underground pipelines is considered.

*Keywords:* earthmover, mathematical model, soil, tool piece.

#### Вступ

Ефективне використання машини для розкривання підземних трубопроводів [1] при їх капітальному ремонті можливе за умови застосування обґрунтованих конструктивних рішень робочого органа та правильного керування процесом роботи машини.

Особливість роботи таких машини полягає у тому, що географічна місцевість, в якій прокладено магістралі, надзвичайно неоднорідна. Це свідчить про те, що робоче середовище може бути різних категорій складності розробки. Робота машини буде оперативною та якісною у тому випадку, якщо на стадії її проектування та дослідження будуть враховані всі можливі фактори, які змінюються в залежності від специфіки виконання робіт.

Створення землерийних машин, у тому числі безперервної дії, базується на методиках їх розрахунку, запропонованих різними авторами. З іншої сторони, окрім розробки моделей різання ґрунту, що є вихідними при проектуванні землерийних машин, необхідно значну увагу приділити правильному підбору режимних параметрів процесу роботи ланцюгового траншеєкопача, зокрема підбору швидкостей перемі-

щення машини та руху ланцюгового робочого органа. Для цього необхідно проаналізувати в яких умовах протікає цей процес і які фактори на нього впливають.

**Мета роботи** полягає у дослідженні різних підходів до математичного опису процесу руйнування ґрунту робочими органами землерийних машин, виявленні їх основних переваг та недоліків. Необхідно також розглянути процес роботи машини з усіма факторами, що на нього впливають, для виявлення можливих шляхів його оптимізації.

#### Виклад основного матеріалу

Дослідження процесу руйнування ґрунту були розпочаті академіком В.П. Горячкіним [2], який вивів залежність для визначення сил опору, що виникають при роботі плуга. Згідно його дослідження рівняння, рівноваги сил (рис. 1), що діють на плуг, визначають за формулою

$$F \cos \theta = f'(G - F \sin \theta + R_N) + R_F + R_\epsilon = \\ = f'(G - F \sin \theta + \alpha bk) + \beta bh + \frac{\delta bh V^2}{2g},$$

де  $F$  – сила тяги плуга, Н;  $\theta$  – кут нахилу вектора сили  $F$ ;  $f'$  – коефіцієнт тертя по верхній плуга по ґрунту;  $G$  – сила ваги ґрунту;  $R_N$  – вертикальна складова опору плуга;  $R_F$  – горизонтальна складова опору плуга;  $R_\epsilon$  – опір поперечному переміщенню масиву (пласта) ґрунту;  $\alpha$  – коефіцієнт, який характеризує нормальну силу опору ґрунту різанню;  $b$  – ширина різання (стружки), м;  $h$  – глибина різання (стружки);  $V$  – швидкість переміщення плуга;  $\beta$  – коефіцієнт, що характеризує дотичну силу опору різанню ґрунту;  $\delta$  – об'ємна вага ґрунту;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Із цього рівняння визначається

$$F = \frac{1}{\cos \theta + f' \sin \theta} \left[ f'G + (\alpha f' + \beta)bh + \frac{\delta bhV^2}{2g} \right].$$

Позначивши

$$f = \frac{f'}{\cos \theta + f' \sin \theta}; \quad k = \frac{\alpha f' + \beta}{\cos \theta + f' \sin \theta};$$

$$\epsilon = \frac{\delta}{2g(\cos \theta + f' \sin \theta)},$$

можна отримати

$$F = fG + kbh + \epsilon bhV^2,$$

де  $kbh$  – опір різанню ґрунту;  $\epsilon$  – емпіричний коефіцієнт,  $\epsilon = 0,1k$ .

Формула В.П. Горячкіна, доволі чітко відображаючи фізичну сутність процесу, стала основою для розрахунку сільськогосподарських машин. Але, враховуючи особливості процесу руйнування ґрунту плугом (за принципом косо́го різання і відкидання пласта ґрунту), можна стверджувати про її непридатність до застосування для розрахунку землерийних машин, що працюють переважно при прямому різанні ґрунту із відділенням стружки.

Професор М.Г. Домбровський [3] запропонував розрахувати силу опору ґрунту руйнуванню на основі експериментальних даних. Сутність його методу полягає у тому, що розглядається власне не процес різання, а процес копання (крім різання ґрунту, додається опір призми волочіння, наповнення ковша та інших параметрів процесу). Розрахункова формула за М.Г. Домб-

ровським  $F = k_{\text{пит}}bh$ , де  $k_{\text{пит}}$  – питомий опір копання ґрунту ковшем, який враховує категорію ґрунту та параметри конкретного виду робочого органу. Для кожної машини в різних ґрунтових середовищах це значення буде різним через неоднакові умови процесу, що, звичайно, є недоліком моделі.

Д.т.н., проф. І.Я. Айзеншток [4] для розрахунку сили різання ґрунту використав вираз, подібний до формули М.Г. Домбровського, але із врахуванням залежності питомої сили різання від кута різання та тертя ґрунту. Ці додаткові параметри введено шляхом видозміни формули І.А. Зворикіна для визначення сили різання металів [5].

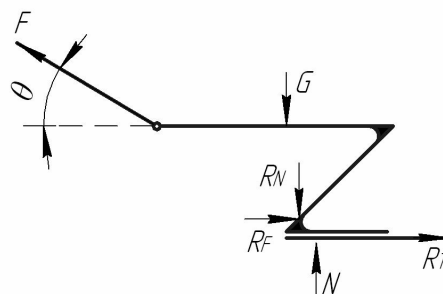


Рис. 1. Схема до виводу формули В.П. Горячкіна

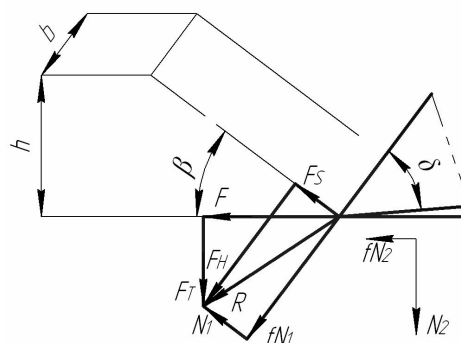


Рис. 2. Схема сил різання за І.Я. Айзенштоком

Згідно із розрахунковою схемою на рис. 2, формула має вигляд

$$F = k_1bh \frac{\cos \nu}{\cos(\nu + \beta)[1 - \text{tg} \rho \text{tg}(\nu + \beta) \sin \beta]},$$

де  $k_1$  – коефіцієнт зчеплення ґрунту; кут  $\nu$  приймається (із умови мінімуму сили різання)  $\nu = 90^\circ - \rho - 2\beta$ ; кут нахи-

лу поверхні зсуву  $\beta = 90^\circ - \frac{\delta + \mu + \rho}{2}$ ,  
 $\mu$  – кут тертя ґрунту по ножу.

Теорія І.Я. Айзенштока базується на наступних припущеннях: поверхня зсуву є плоскою; сили різання та опору ґрунту прикладено до ріжучої кромки; опір поверхні зсуву в ґрунті є постійними та ін. Ці припущення спростують розуміння процесу та полегшують математичний опис руйнування ґрунту, але вони не відповідають дійсній картині вказаних явищ (процесів).

Дослідження д.т.н., проф. А.Н. Зеленіна [6] було спрямовано на встановлення залежності між опором ґрунту різанню та показниками ударника ДорНДІ, а також геометричними параметрами робочого органа, вологістю ґрунту та режимом різання.

Формула сили різання для елементарних профілів (підрізні ножі канавокопачів, фрез тощо) має вид

$$F = Ch^{1,35} (1 + 0,1S) \left( 1 - \frac{90^\circ - \alpha}{180^\circ} \right) \beta_0,$$

де  $C$  – кількість ударів ударника ДорНДІ;  
 $S$  – товщина елементарного профілю ( $S > 1$  см);  $\alpha$  – кут різання, град.;  $\beta_0$  – коефіцієнт, який враховує вплив зміни кута загострення різального інструменту. При кутах від  $180^\circ$  до  $15^\circ \dots 50^\circ$  коефіцієнт приймається від 1 до 0,81.

Силу різання ножами розміщеними по периметру (ковшовими робочими органами) представлено у вигляді

$$F = Ch^{1,35} (1 + 2,6b) (1 + 0,0075) \delta z \mu,$$

де  $h$  і  $b$  – відповідно товщина і ширина зрізу, см;  $z$  – коефіцієнт, що враховує вплив зубців на середньому ножі ріжучого периметра ( $z = 0,7 \dots 0,9$ );  $\mu$  – коефіцієнт, який характеризує вплив кількості сторін, що здійснюють блоковане різання (при  $b > 0,75$ ,  $\mu = 0,75 \dots 1,0$ ).

Аналізуючи цю формулу, Е.Р. Петерс дійшов висновку, що менші витрати енергій на розробку ґрунту будуть у тому випадку, якщо відділятиметься стружка меншої товщини ( $h \rightarrow 0$ ) за збільшеною її шириною, що є помилковим. Це обумовлено тим, що сила різання є стрімко зростаючою

функцією від товщини зрізу. Але, незважаючи на ці протиріччя, дослідження А.Н. Зеленіна мають високе практичне значення і можливість застосування в проектуванні землерийних машин.

Згідно з дослідженнями д.т.н., проф. Ю.О. Ветрова [7], сила блокованого різання залежить від трьох складових (рис. 3):

$$F = F_{\text{св}} + F_{\text{бок}} + F_{\text{бок.зр}},$$

де  $F_{\text{св}}$  – сила руйнування ґрунту лобовою частиною прорізу (пропорційна площі лобової частини, також залежить від кута різання і міцності ґрунтів);  $F_{\text{бок}}$  – сила руйнування ґрунту в бічних частинах прорізу (бокових розширеннях), пов'язана з виникненням напруження відриву;  $F_{\text{бок.зр}}$  – сила руйнування ґрунту боковими ребрами різця (залежить від міцності ґрунту і не залежить від ширини та кута різання).

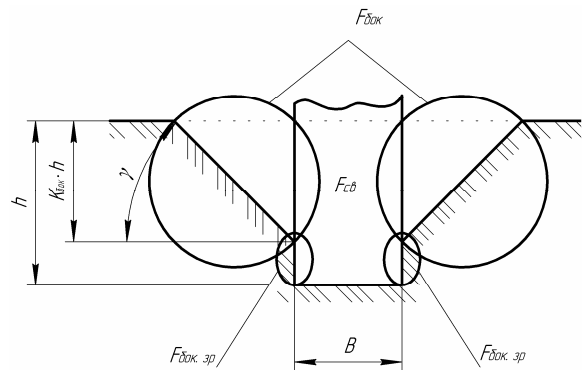


Рис. 3. Розподіл зон дії складових сили опору блокованого різання ґрунту

Сила подолання опору на лобовій частині різця  $F_{\text{св}} = \phi m_{\text{св}} b h$ , де  $\phi$  – коефіцієнт, що враховує зміну цієї сили в залежності від значення кута різання  $\delta$ ,  $\phi = 0,6 \dots 2,05$ ;  $m_{\text{св}}$  – питома сила різання ґрунту в лобовій частині прорізу при  $\delta = 45^\circ$ .

Сила руйнування ґрунту в бокових розширеннях прорізу  $F_{\text{бок}} = m_{\text{бок}} f_{\text{бок}}$ , де  $m_{\text{бок}}$  – питома сила руйнування ґрунту в бокових розширеннях прорізу;  $f_{\text{бок}}$  – сумарна площа бокових розширень прорізу.

Сила руйнування ґрунту боковими ребрами різця  $F_{\text{бок.зр}} = m_{\text{бок.зр}} L_{\text{бок.зр}}$ , де  $m_{\text{бок.зр}}$  – питома сила різання ґрунту боковими ребрами різця;  $L_{\text{бок.зр}}$  – сумарна довжина бокових ребер різця, які виконують зрізання.

Враховуючи те, що при роботі траншейної машини на ріжучій кромці виникає площадка затуплення, а отже і додаткове зусилля  $F_{\text{пл.зат}}$ . Формула для визначення сумарної сили блокованого різання матиме вигляд

$$F = F_{\text{св}} + F_{\text{бок}} + F_{\text{бок.зр}} + F_{\text{пл.зат}}.$$

Вказані залежності для визначення зусиль на робочих органах землерийних машин застосовуються при квазістатичному різанні ґрунту, тобто на невисоких швидкостях.

Опір різанню в'язкопластичного ґрунту

$$F = \sum_{i=1}^7 F_i, \text{ за результатами досліджень}$$

д.т.н., проф. М.К. Сукача [8], обумовлено (рис. 4): зчепленням між елементами зсуву зливної стружки на передній грані ножа  $F_1 = \tau_0 b h t g \alpha$ ; навантаженням в бічних прорізах при відокремленні стружки від масиву  $F_2 = \tau_0 h^2 / \cos \alpha$ ; опором ґрунту збоку інструменту від зчеплення цілика

$$F_3 = \tau_0 \left\{ \frac{2\varepsilon(2+\varepsilon)h^2}{\sin 2\alpha} + \frac{hd(1+\varepsilon)}{\sin \alpha} - d^2 [\text{ctg}(\alpha-\beta) - \text{ctg}\alpha] \right\}$$

і в'язкості деформованого середовища

$$F_4 = \left[ \frac{2h(1+\varepsilon)}{\sin \alpha} - d \text{ctg}(\alpha-\beta) + d \text{ctg}\alpha \right] \times \sqrt{2\mu v_0 \tau_0 d \left[ \frac{h}{l} \text{tg}\alpha + \frac{h^2}{bl \cos \alpha} + \frac{l}{h} \sin 2\alpha \left( 1 + \frac{\eta}{3} \right) \right]}$$

силами в'язкості в суміжному шарі ґрунту перед ножем

$$F_5 = \frac{2\varepsilon(2+\varepsilon)h^{1.5}}{\sin \alpha} \sqrt{\mu v_0 \tau_0 \left( 1 + \frac{\eta}{3} \right)}$$

компенсацією тиску біля нижньої кромки ножа для подолання опору в'язкості ґрунту

$$F_6 = \frac{\tau_0 b l^2}{6h} (3 + \eta) \sin 2\alpha;$$

тертям стружки по лобовій поверхні ножа  $F_7 = \tau_0 (1 + \eta) b l \cos \alpha$ . Тут  $h, b, \alpha$  – глибина,

ширина і кут різання ґрунту;  $\tau_0, \mu$  – відповідно граничне напруження зсуву (зчеплення) та в'язкість ґрунту;  $\varepsilon$  – співвідношення товщини шару текучості стружки (в якому відбувається основний перепад швидкості і приріст дотичного напруження за рахунок в'язкості) до величини квазітвердого шару (в якому переноситься основна маса ґрунту);  $\beta, d, l$  – задній кут різання, товщина і довжина ножа;  $v_0$  – швидкість різання ґрунту;  $\eta$  – відношення додаткового дотичного напруження на лобовій поверхні ножа (обумовленого в'язкістю ґрунту) до величини його зчеплення.

Нелінійність дотичного напруження  $\tilde{\tau}_l$  від в'язкого опору ґрунту, кути внутрішнього тертя  $\varphi$  і зсуву елементів зливної стружки  $\psi$  у цій моделі враховується, виходячи з реологічного рівняння для бінгамова середовища:

$$\tau = C + \sigma_n \text{tg}\varphi + \mu (dv_{\text{л}}/d\tilde{y})^n,$$

де  $C$  – зчеплення ґрунту;  $\sigma_n$  – нормальний тиск;  $v_{\text{л}}$  – швидкість руху ґрунту вздовж лобової поверхні ножа;  $\tilde{y}$  – товщина зони текучості ґрунту в стружці;  $n$  – показник ступеневої залежності дотичного напруження від в'язкості ґрунту (для рідини  $n = 1$ , для сухого середовища  $n = 0,5$ ); величина  $C + \sigma_n \text{tg}\varphi = \tau_0$  є граничним дотичним напруженням.

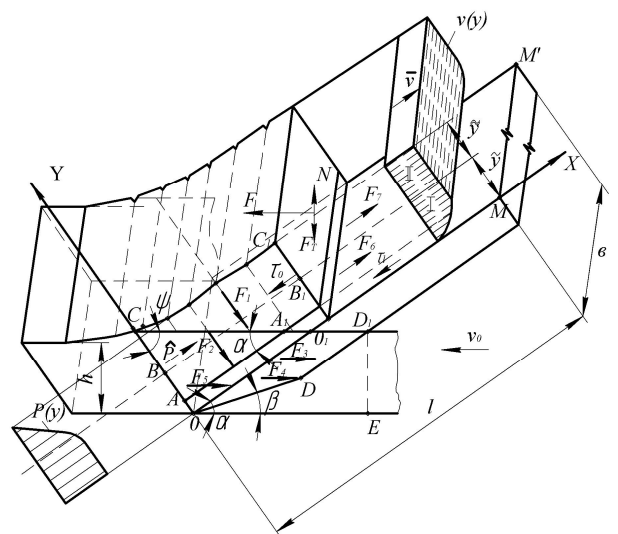


Рис. 4. Розрахункова схема різання в'язкопластичного ґрунту

З урахуванням розміру квазітвердої зони  $y_1 = h \sin(\alpha + \psi) / \sin \psi$ , де відбувається основний перенос ґрунту, швидкостей руху ґрунту по передній грані ножа  $v_{д} = v_0 \sin \psi / \sin(\alpha + \psi)$  і зсуву елементів стружки під кутом  $\psi$  до поверхні ґрунту  $v_c = v_0 \sin \alpha / \sin(\alpha + \psi)$  одержано критерії

$$\text{подібності процесу } k_{\psi} = \frac{K \sin^2 \psi}{\sin^2(\alpha + \psi)};$$

$K = \mu v_0 / Ch$ . Додаткове дотичне напруження, яке спричинене в'язким опором ґрунту в зоні текучості на лобовій поверхні ножа

$$\tilde{\tau}_l = \mu \left( \frac{k_{\psi} C}{3 \varepsilon \mu} \right)^n.$$

Основною відмінністю цієї моделі є врахування в'язкопластичних властивостей ґрунтів, що дозволяє розширити область дослідження процесу взаємодії робочих органів землерийних машин із середовищем, включаючи такі специфічні умови як недреноване та консолидоване різання, що відповідає руйнуванню ґрунту в умовах високого гідро- і геостатичного тиску.

Значний вклад в теорію різання ґрунтів багатоярусними траншеєкопачами вніс д.т.н., проф. С.В. Кравець, модель якого базується на урахуванні просторової взаємодії робочого інструменту з ґрунтом і лінійному законі розподілу тиску ґрунту по глибині ярусу [9]. Вперше запропоновано такі принципи, як рівність площ поперечного перерізу зрізаного шару і прохідних вікон у кожному ярусі, витрат ґрунту в суміжних ярусах, незалежність роботи попередніх ґрунторозробних органів від наступних.

Сумарний тяговий опір переміщенню багатоярусного робочого органа дорівнює

$$P_{\Sigma} = P_1 + \sum_{k=2}^{z=1} P_k + P_z + P_3 + P_d \sin \beta_{\text{тр}} + 2P_6 \sin \beta_{\text{тр}},$$

де  $P_1, P_k, P_z$  – горизонтальні складові опору ґрунту зсуву відповідно у першому, середніх і нижньому ярусах;  $P_3$  – опір від затуплення різальних кромки;  $P_d$  – опір від динамічного натиску порушеної структури на стійку-розсікач;  $P_6$  – опір від тиску ґрунту на бічні стінки стояка. Для відвальних ро-

бочих органів додатково враховується опір поярусному транспортуванню ґрунтових пластів у напрямку прохідних вікон.

З урахуванням особливостей робочого процесу С.В. Кравцем отримано математичні моделі критичної глибини різання, довжини лемеша, форми ґрунтового ядра ущільнення, визначено кути зсуву ґрунту в повздовжній площині, а також обґрунтовано закони розподілу тиску ґрунту на робочі поверхні ґрунторозробних органів за умови транспортування його із зони різання кожного ярусу з мінімальним ущільненням.

Д.т.н., проф. В.Л. Баладінський довів ефективність застосування динамічного характеру руйнування міцних ґрунтів [10]. Згідно з його моделлю, опір ґрунту руйнуванню

$$F = \frac{USK_d}{2VK_{\alpha}},$$

де  $U$  – швидкість розповсюдження деформацій в ґрунті;  $S$  – площа контакту ріжучого інструменту з ґрунтом;  $K_d$  – питомий опір ґрунту руйнуванню;  $K_{\alpha}$  – коефіцієнт, що враховує кут різання інструментом. Параметри  $U$  і  $K_d$  визначаються за формулами

$$U = \sqrt{\frac{E_d(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}; \quad K_d = \rho V^2 + \sigma \varepsilon,$$

де  $E_d$  – модуль деформації ґрунтів;  $\mu$  – коефіцієнт поперечної деформації;  $\rho$  – щільність ґрунту;  $\sigma$  – границя міцності на стиск;  $\varepsilon$  – відносна деформація.

Розглянуті моделі за різними теоріями поєднують в собі залежності між силовими, геометричними та кінематичними параметрами процесу. Їх використання на практиці часто дає задовільні результати, оскільки вони розроблені для конкретних робочих органів (РО) і не можуть застосовуватись при значній модернізації робочих органів.

Запропоновані залежності мають у своїх аналітичних описах значну кількість параметрів, отриманих експериментально. Це підвищує їх точність і наближує отримані дані до реальних показників із допустимою похибкою. У той

же час необхідне більш поглиблене дослідження теоретичного змісту процесу руйнування ґрунту і його сутності з якомога меншою кількістю припущень, що спрощують його опис.

Як уже зазначалося, важливою задачею є розгляд процесу роботи машини для розкривання підземних трубопроводів з урахуванням механізму взаємодії різних факторів, що впливають на цей процес.

До *першої групи факторів* ( $x_i$ ) слід віднести такі показники, як: опір ґрунтів різанню, абразивні властивості ґрунтів, ріжучу здатність інструменту. Розглянемо їх детальніше (рис. 5).

Опір ґрунтів різанню носить випадковий характер в різних точках ґрунтового середовища. Тому його чисельне значення може знаходитись лише в певному інтервалі [7]. Вказаний інтервал (утворюється між максимумами сил різання, із можливістю її від'ємного значення) може бути описаний законом нормального розподілу (законом Гауса), і виражається функцією

$$f(F, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F_i - F)^2}{2\sigma^2}},$$

де  $F_i$ ;  $F$  – відповідно часткове та середнє значення максимумів сили різання;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення максимумів сили різання.

Абразивність ґрунтів зростає зі збільшенням кількості частинок  $\text{SiO}_2$  та їх розміру. Відповідно при взаємодії з талими та мерзлими ґрунтами знос робочих органів землерийних машин збільшується більше ніж у 2 рази зі зменшенням складу глинистих частинок. До того ж, збільшення густини ґрунтів та зменшення вологості нижче 15...20 % також призводить до підвищення зносу робочих органів.

Ріжуча здатність інструменту (різців, ножів) землерийних машин в процесі їх експлуатації погіршується. Це обумовлено абразивним зносом. В деяких випадках робочі органи зношуються до граничних значень за 2...4 зміни роботи.

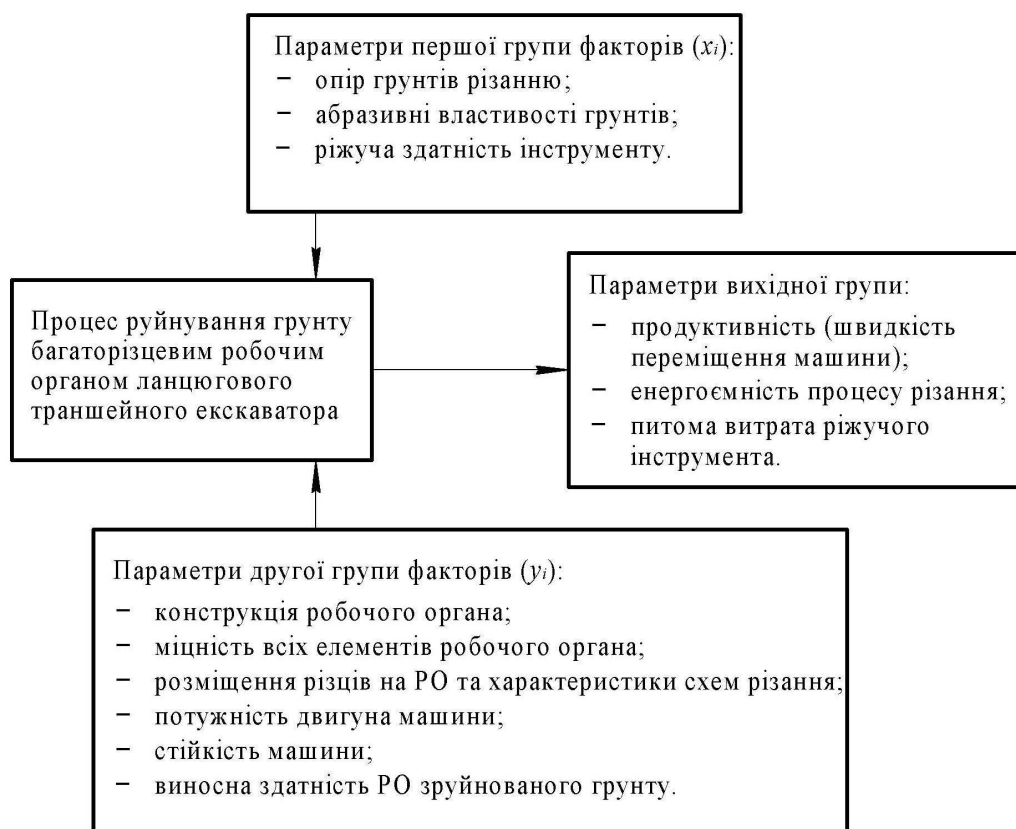


Рис. 5. Схема взаємодії факторів, що діють в процесі роботи ланцюгового траншеєкопача

В результаті цього утворюються площадки зносу, які призводять до значного підвищення енергоємності різання ґрунту.

Виходячи з цього, можна зробити висновки, що зниження швидкості зносу робочого обладнання дозволить значно підвищити продуктивність та ефективність роботи землерийних машин. Цього можна досягти завдяки розробці методики визначення оптимальних геометричних параметрів та конфігурацій робочих органів землерийних машин.

Крім зазначених факторів, під час роботи траншеєкопача можливе виникнення певних впливів, які носять випадковий характер і не можуть бути точно визначені в кількісному вимірі.

Отже, можна констатувати стохастичність вказаних факторів, які обумовлено змінністю в просторі та часі властивостей ґрунтового середовища, непостійністю необхідних геометричних параметрів різальних елементів внаслідок їх затуплення, а також дією різних випадкових факторів.

Тому, комплексний або частковий вплив зазначених факторів на процес роботи ланцюгового траншеєкопача не може бути свідомо керований для оптимізації протікання цього процесу.

З іншого боку, процес роботи машини для розкривання трубопроводів може бути змінений в залежності від таких керованих параметрів (*параметрів другої групи,  $y_i$* ), як: конструкція робочого органа, міцність всіх елементів робочого органа, розміщення різців на РО та характеристики схем різання, потужність двигуна, стійкість машини, виносна здатність РО по видаленню зруйнованого ґрунту із траншеї.

Головною метою конструктивного удосконалення робочих органів землерийних машин є зниження енергоємності технологічного процесу та розширення їх функціональних можливостей, що значно підвищує ефективність їх роботи.

Експериментальними дослідженнями, виконаними на стенді фізичного моделювання д.т.н., проф. В.І. Баловневим [11], встановлено вплив конструктивно-кінематичних параметрів робочого органа на енергоємність та продуктивність проце-

су роботи ланцюгового траншейного екскаватора. Технічна продуктивність збільшується (в середньому на 15...20 %) зі збільшенням довжини направляючої рами (відповідно і забою) завдяки покращенню процесу заповнення міжрізцевого простору ґрунтом. Причому радіус-вектор рами  $R$  (м) виражається в полярних координатах залежністю  $R = 0,028e^{0,88\varphi}$ , де  $\varphi$  – поточний кут кривої, рад.,  $e = 2,71$  – основа натурального логарифма. Тому, застосування криволінійної рами призводить до зменшення потужності холостого ходу та питомої потужності копання, а отже і енергоємності руйнування ґрунту.

На міцність різального елемента (різця) безпосередньо впливає поперечний переріз держака різця, довжина його робочої зони (виліт) та геометричні параметри паяного з'єднання між армуючою пластиною та держакком різця.

Для безпечної та надійної роботи необхідно правильно вибрати ланцюг, на якому будуть закріплено ґрунтовиносні балочки з різцями. При розрахунках сили тяги в ланцюгу робочого органа враховують такі складові: опір копанню ґрунту, опір піднімання ґрунту до місця розвантаження, опір тертя в напрямних робочого ланцюга (визначення останнього зазнає складнощів, тому його враховують коефіцієнтом корисної дії ланцюга).

На робочий орган впливають також динамічні зусилля, які спричинюються нерівномірністю руху ланцюга, що огинає багатогранні блоки (внаслідок прискорень різного знаку). Зазвичай їх прийнято визначати за формулою Ганфштегеля

$$F_{\text{л}} = \frac{3\pi^2 V_{\text{л}}^2 G_{\text{л}}}{L_{\text{л}} z_1^2 g},$$

де  $V_{\text{л}}$  – швидкість руху ланцюга;  $G_{\text{л}}$  – повна вага ланцюга з ґрунторозробним обладнанням;  $L_{\text{л}}$  – крок ланцюга;  $z_1$  – число граней (зубів) приводного

блока;  $g$  – прискорення вільного падіння [12].

У подальшому було встановлено, що вказана залежність не повною мірою відповідає дійсним процесам, які протікають в ланцюгу. Згідно цієї формули динамічні зусилля прямо пропорційні масі частин, що рухаються і квадрату швидкості ланцюга, але взагалі не враховано величину загального натягу ланцюга (його крок та число граней блока залишається постійним). Насправді ж, при постійних кінематичних параметрах привода ланцюга, зусилля зростають зі збільшенням навантаження на ланцюг від сил опору середовища при його руйнуванні.

Розміщення різців на робочому органі та характеристики схем різання мають важливе значення. Як відомо, від того, за яким принципом відбувається процес різання ґрунту залежить величина витраченої на це енергії. Так, найменш енерговитратним є вільне різання, але на практиці найчастіше відбувається блоковане чи напівблоковане різання. На даний час відсутні рекомендації щодо того, яка схема розміщення різального інструменту на робочому органі та які геометричні параметри різців необхідно застосовувати виходячи з мінімуму енерговитрат на робочий процес. Тому застосування спеціальних схем розміщення різальних елементів, які по можливості зменшують кількість різців, що здійснюють блоковане різання, сприяє зменшенню енергоємності процесу. Ці схеми характеризуються числом ліній різання  $n_d$  (в сумі дають ширину зрізу  $t$ ), кроком розташування вздовж ліній різання  $l_p$  та коефіцієнтом, який враховує блокованість різців [13].

Потужність двигуна машини витрачається на привід робочого органа, здійснення ним копання та підняття ґрунту, привод конвеєра, переміщення машини. Виносна здатність робочого обладнання по видаленню зруйнованого ґрунту із траншеї залежить від кінематики руху робочого обладнання та виду і стану ґрунту.

До параметрів вихідної групи ( $V_i$ ) відносяться: продуктивність, енергоємність процесу різання ґрунту, питома витрата ріжучого інструменту (в результаті абразив-

ного зносу). Схему взаємодії усіх факторів показано на рис. 5.

Продуктивність (технічна та експлуатаційна) є головним параметром траншейних машин, її визначають, виходячи з умов роботи проекрованої машини, розрахункових режимів (швидкості подачі машини, швидкості різання і т.д.) та навантаження на робочому органі.

Для розширення функціональних можливостей ланцюгових екскаваторів, потрібно, окрім широкого діапазону швидкостей подачі (поздовжнього руху машини), забезпечити можливість регулювання швидкості різання. Це необхідно для оперативного керування машиною в процесі роботи при зміні зовнішніх факторів (впливів).

Отже, отримання залежностей, що описують взаємозв'язок між керованими величинами (параметрами) та зовнішніми факторами, дозволить підвищити ефективність технологічних та режимних параметрів; оптимізувати процес роботи траншеєкопача можливо шляхом пошуку певних систем зв'язків між вказаними групами факторів.

У загальному випадку це система зв'язків виду

$$V_i = f(x_i, y_i) \rightarrow \max,$$

де  $V_i$  – швидкість подачі (швидкість переміщення машини). Детальний розгляд цих взаємозв'язків дозволить обґрунтувати оптимальні конструктивні рішення машини та її технологічні параметри, а також встановити раціональний режим роботи, виходячи з умов робочого середовища та геометричних параметрів траншеї.

## Висновки

1. Аналізуючи роботи, які присвячено дослідженню процесу різання ґрунту, можна дійти висновку про те, що: механізм взаємодії робочих органів землерийних машин з ґрунтом досить складний і недостатньо досліджений; під час різання на робочому органі відбувається утворення ядра ущільнення ґрунту, вплив якого на процес, виходячи з мір-



кувань різних вчених, має суперечливий характер; дослідження процесу руйнування ґрунтового середовища з урахуванням ядра ущільнення має свій математичний опис для умов замкненого простору; наявність існування критичної глибини різання відмічається як вітчизняними, так і закордонними вченими, але достатнього наукового обґрунтування цього явища поки що немає.

2. Процес роботи машини для розкривання підземних трубопроводів складається з безперервного руйнування ґрунту ріжучим інструментом, його транспортування до конвеєра та подальшої евакуації в брус-твер. Робота машини характеризується взаємодією групи факторів, які у різному ступені впливають на процес. Дослідження впливу та взаємодії цих факторів дозволить виявити реальні шляхи оптимізації процесу різання, вилучення та транспортування ґрунту. Мірою ефективності роботи може бути продуктивність, яка оцінюється швидкістю погонажного переміщення землерийної машини.

### Література

1. Сукач М.К., Лисак С.І. Підвищення ефективності робочого обладнання машини для розкривання трубопроводів // Гірн., буд., дор. і меліорат. машини.– 2007.– Вип.71.– С.3–9.
2. Горячкин В.П. Рациональная формула силы тяги плуга.– М.: ВСНХ СССР, 1935.– С.24 – 27.
3. Домбровский Н.Г., Панкратов С.А. Землеройные машины.– М.: Госстройиздат, 1961.– 645 с.
4. Айзеншток И.Я. О физической теории резания ґрунтов // Горный журнал.– 1949.– № 5.– С.75 – 79.
5. Зворыкин К.А. Работа и усилие для отделения металлических стружек.– М.: Русская типография, 1893.– 35 с.
6. Зеленин А.Н. Основы разрушения ґрунтов механическими способами.– М.: Машиностроение, 1968.– 376 с.
7. Ветров Ю.А. Резание ґрунтов землеройными машинами.– М.: Машиностроение, 1971.– 357 с.
8. Сукач М.К. Рабочие процессы глубоководных машин.– К.: Наук. думка, 2004.– 364 с.
9. Кравець С.В. Ґрунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій (Основи теорії, проектування та створення).– Рівне: РДТУ, 1999.– 277 с.
10. Баладинский В.Л. Динамическое разрушение ґрунтов.– К.: Изд-во Киев. ун-та, 1971.– 226 с.
11. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин.– М.: Машиностроение, 1994.– 335 с.
12. Гарбузов З.Е. и др. Землеройные машины непрерывного действия. Конструкции и расчеты.– М.: Машиностроение, 1965.– 234 с.
13. Школьный А.Н. Обоснование выбора конструктивных и технологических параметров исполнительного органа бесковшовых цепных траншекопателей: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.05.04.– Томск, 2006.– 23 с.

Рецензент: С.В. Кравець, д.т.н., проф.  
(НУВГП)

Отримано: 30.11.2009 р.