

УДК 631.3(075.8)

## КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ АНАЛІЗУ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН З ОБРОБЛЮВАНИМ ҐРУНТОМ: ВИЗНАЧЕННЯ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ҐРУНТУ Й ПЕРІОДИЧНІСТЮ ЗМІНИ ЗУСИЛЬ РІЗАННЯ

І. М. Сівак, Ю. В. Човнюк, Ю. О. Гуменюк

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Кореспонденція авторів: *sivakim@ukr.net*.

Історія статті: отримано – квітень 2019, акцептовано – червень 2019.

Бібл. 4, рис. 3, табл. 0.

**Анотація.** У роботі проведено визначення зв'язків між характеристиками оброблюваного ґрунту й періодичністю зміни зусиль різання. При руйнуванні ґрунту сільськогосподарського призначення (ГСП) зсувом тривалість циклу руйнування обумовлюється швидкістю машинно-тракторного агрегату (МТА) й деформацією ґрунту у напрямку різання, достатньо для зсуву елемента по поверхні ковзання. У зв'язку з високими швидкостями деформування здатність ГСП чинити опір деформаціям оцінюється динамічним коефіцієнтом деформації. Створення нових енергонасичених, швидкісних базових тракторів та тягачів викликає підвищення робочих швидкостей агрегованих з ними машин. Враховуючи, що ніж МТА у більшості випадків можна подати у вигляді простого (двогранного) клина, знайдений вплив швидкості на опір копанню ГСП простим клином.

**Ключові слова:** концепція, аналіз, взаємодія, робочий орган, сільськогосподарські машини, ґрунт, обробка, зв'язки, визначення, характеристика ґрунту, періодичність, зміна, зусилля, різання.

### Постановка проблеми

При руйнуванні ґрунту сільськогосподарського призначення (ГСП) зсувом тривалість циклу руйнування обумовлюється швидкістю руху машинно-тракторного агрегату (МТА) й деформацією ГСП у напрямку різання, достатньо для зсуву елемента по поверхні ковзання. У зв'язку з високими швидкостями деформування здатність ГСП чинити опір деформаціями оцінюються динамічним коефіцієнтом деформації. Необхідно встановити площу контакту, напруження на лезі ножа, умови, за яких відбувається зсув елемента ГСП, шлях зколу й частоту коливань навантаження на ніж. Крім того, слід встановити вплив швидкості на зусилля обробки (копання) ГСП. Саме цей підхід дозволить у майбутньому створювати енергонасичені, швидкісні базові трактори, тягачі, МТА, які мають підвищені швидкості функціонування агрегованих з ними машин. Враховуючи, що ніж МТА у більшості випадків можна подати у вигляді простого

(двогранного) клина, слід знайти вплив швидкості на опір обробці (копанню) ГСП простим клином.

### Аналіз останніх досліджень

Автори робіт [1-4] всебічно дослідили процес обробки ґрунтів землерийними, землерийно-транспортними машинами й встановили основні закономірності взаємодії робочих органів вказаних машин з ГСП. Проте, стосовно ГСП такі дослідження не проведені у повному обсязі, тому, на думку авторів даного дослідження, слід вивчити всебічно виникаючі закономірності взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин саме з ГСП.

### Мета досліджень

Метою даної роботи є встановлення зв'язків та закономірностей між характеристиками ГСП й періодичністю зміни зусиль різання, а також впливу швидкості МТА на зусилля обробки ГСП, зокрема, у процесах копання.

### Результати досліджень

Відомо [2,3], що при руйнуванні ґрунтів (у т.ч. ГСП) зсувом, як правило, тривалість циклу процесу руйнування обумовлюється у першу чергу швидкістю руху МТА й деформацією ГСП у напрямку різання, достатньою саме для зсуву елемента ґрунту по поверхні ковзання робочого органа (РО). У зв'язку з високими швидкостями деформування ГСП здатність ґрунту чинити опір деформаціями оцінюється динамічним коефіцієнтом деформації. Тоді  $b = C_g \cdot x$ . Тут  $b$  – напруження у ґрунті перед лезом ножа;  $x$  – деформація.

Підставляючи загальноприйняті значення параметрів ударника матимемо:

$$C_g = 90 / (mh^2 \cdot \sqrt{F}). \quad (1)$$

Всі позначення у (1) введені вище у частині дослідження. Для більшості випадків різання МТА (різання широким ножом) коефіцієнт  $m=0,37$ .

Площа контакту визначається з геометричних співвідношень розмірів елемента зколу при умові, що зкол відбувається по всій довжині ножа L:

$$F=L \cdot x \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin x}{\sin(\alpha+x)}, \quad (2)$$

де  $\alpha, x$  – кути різання й зколу.

Тоді напруження на лезі ножа може бути подане залежністю:

$$b = \frac{90 \cdot x}{0,37 \cdot h^2 \cdot \sqrt{L \cdot x \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin x}{\sin(\alpha+x)}}}. \quad (3)$$

Із урахуванням співвідношенням між глибиною занурення ударника (h) за перший удар й числом ударів (n) запишемо:

$$b = \frac{243}{h^2} \sqrt{\frac{x \cdot \sin(\alpha+x)}{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin x}} = 2,43 \cdot n \cdot \sqrt{\frac{x \cdot \sin(\alpha+x)}{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin x}}. \quad (4)$$

Прирівнюючи отримане напруження до граничного його значення, при якому відбувається зсув елемента ГСП, маємо рівняння:

$$2,43 \cdot \sqrt{\frac{x \cdot \sin(\alpha+x)}{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin x}} = \frac{c \cdot f_1(\rho) + q_x + t_x^1 \cdot h}{\frac{k_1^2}{k_2} c t y^2(\alpha+\delta) + f_2(\rho)} = b_{гр}. \quad (5)$$

(Всі позначення у правій частині (5) введені у частині дослідження).

Тоді шлях зколу ( довжина різання, на котрій відбувається один цикл руйнування):

$$X = \frac{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin x}{5,9 n^2 \cdot \sin(\alpha+x)} \cdot b_{гр}^2. \quad (6)$$

Тривалість одного циклу руйнування при швидкості машини  $v_M$ :

$$t_{ц} = \frac{L \cdot \sin \alpha \cdot \sin x}{5,9 \cdot v_M \cdot n^2 \cdot \sin(\alpha+x)} \cdot b_{гр}^2. \quad (7)$$

Частота коливань навантаження визначається виразом  $f_k = 60/t_{ц}$ , або:

$$f_k \approx \frac{v_M \cdot n^2 \cdot \sin(\alpha+x)}{10 \cdot L \cdot b_{гр} \cdot \sin \alpha \cdot \sin x}. \quad (8)$$

За широких ножів внаслідок різної міцності ділянок ГСП руйнування відбувається неодноразомно по довжині ножа, завдяки чому амплітуда коливань навантаження знижується, а частота зростає.

Встановимо далі вплив швидкості руху МТА на величину зусилля, яке необхідне для обробки ГСП.

Відомо, що створення нових енергонасичених, швидкісних базових тракторів, тягачів, МТА викликає підвищення робочих швидкостей агрегованих з ними машин. Враховуючи, що ніж МТА у більшості випадків можна подати у виді простого (двогранного) клина, знаходимо вплив швидкості на опір обробці ГСП простим клином. Слід зазначити, що у подальшому швидкісним опором будемо називати зусилля, необхідне для розгону елементів ГСП, що відділяються, від стану спокою до деякої швидкості. Переміщення пласту ГСП по поверхні ножа МТА й по поверхням руйнування відбувається після подолання сил тертя, залежних за інших однакових умов від нормальних тисків (у т.ч. від відповідних інерційних сил). Тому зусилля тертя, виникаючі під дією інерційних сил, будемо включати у швидкісний опір. Можливі наступні основні схеми руйнування, а відповідно, й пов'язані з ними розрахункові схеми руху ГСП: руйнування зсувом з утворенням елементної стружки (рис. 1), руйнування відривом без деформування чи з надто малим деформуванням стружки (рис. 2).

Сила F, необхідна для надання швидкості  $v_a$  масі ГСП, яка надходить за час dt на ніж робочого органу (двогранний клин), визначається з рівняння Мещерського для руху змінної маси:

$$m \cdot \frac{dv_a}{dt} = \vec{F} + \frac{dm_1}{dt} \cdot (\vec{v}_n - \vec{v}_a) - \frac{dm_2}{dt} (\vec{v}_0 - \vec{v}_a). \quad (9)$$

Тут  $m$  - поточне значення змінної маси ГСП;  $\frac{dm_1}{dt}$ ,  $\frac{dm_2}{dt}$  - приріст приєднаної й відділеної мас;  $\vec{v}_n, \vec{v}_0$  - абсолютні швидкості приєднуваної та відділеної мас;  $\vec{v}_a$  - абсолютна швидкість маси ГСП;  $\vec{F}$  - головний вектор прикладених сил.

При різанні ГСП з наступним зходженням ґрунтової стружки з площини ножа, тобто, коли  $\frac{dm_1}{dt} = \frac{dm_2}{dt} = \frac{dm}{dt}$ ,

вважаючи відношення швидкості  $(\vec{v}_n - \vec{v}_a)$  і  $(\vec{v}_0 - \vec{v}_a)$  рівними одна одній, матимемо:

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}_a}{dt}. \quad (10)$$

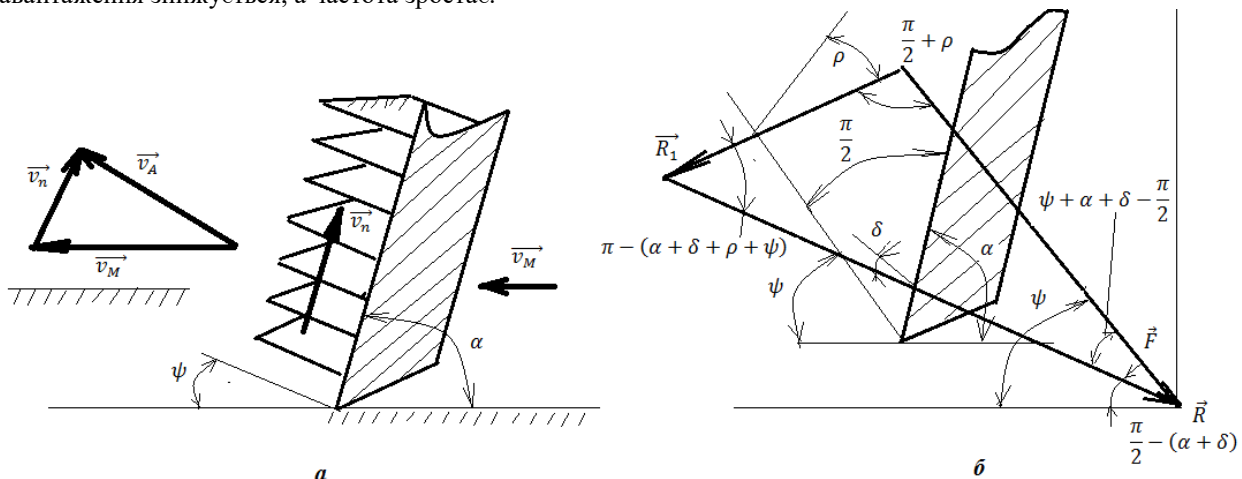


Рис. 1. Інерційний опір при руйнуванні ГСП зсувом: а – схема утворення стружки; б – силовий трикутник.  
 Fig. 1. The inertial resistance to the destruction of the GSP offset.

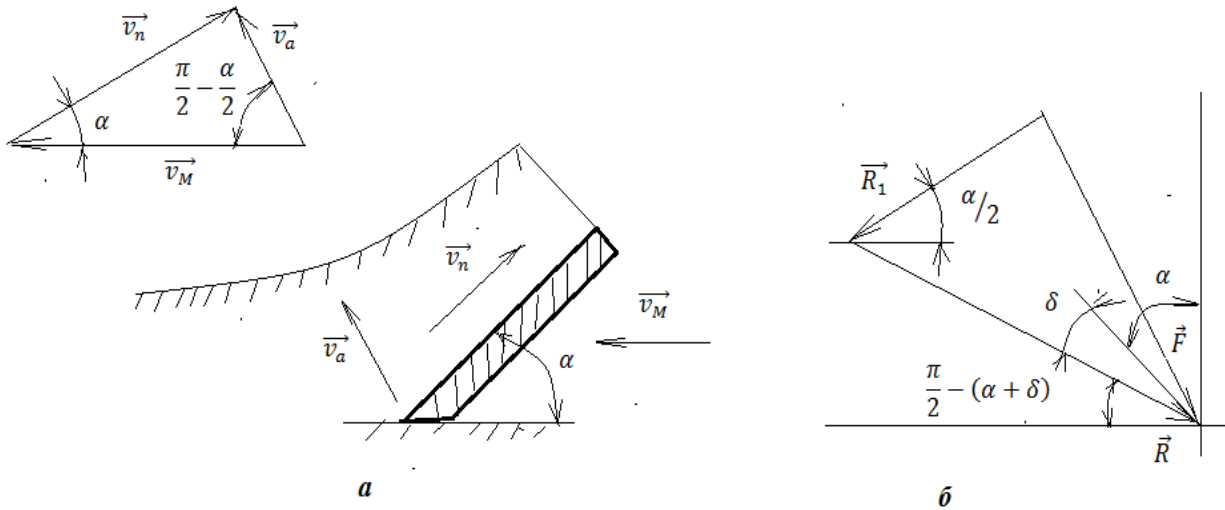


Рис. 2. Інерційний опір при руйнуванні ГСП відривом: а – схема утворення стружки; б – силний трикутник.

Fig. 2. The inertial resistance to the destruction of the GSP margin.

Для знаходження приросту швидкості вважатимемо, що ГСП розганяється від швидкості  $\vec{v}_n = 0$  до абсолютної швидкості  $\vec{v}_a$  за час розгону  $t_p$ . Тоді, якщо прийняти процес рівноприскорення,  $m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \frac{\vec{v}}{t_p}$ . При кроці руйнування  $S \cdot m = L \cdot h \cdot S \cdot \gamma, t_p = S/v_M$ . Отже, залежність (10) подано у вигляді:

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = L \cdot h \cdot \gamma \cdot v_M \cdot \vec{v} \quad (11)$$

Значення і напрямок абсолютної швидкості ГСП  $\vec{v}$ , а також напрямок зусилля  $\vec{F}$  обумовлені розрахунковою схемою руйнування. При руйнуванні ГСП зсувом з елементною стружкою матимемо з трикутника швидкостей згідно теореми синусів (рис. 1):

$$v_a = v_M \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + x)} \quad (12)$$

де:  $a$  – кут різання,  $x$  – кут зсуву ГСП, котрий знаходиться у відповідності з положеннями статки сипучого середовища.

Тоді:

$$F = L \cdot h \cdot \gamma \cdot v_M^2 \cdot \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha + x)} \quad (13)$$

Зусилля  $F$  діє на лобову грань ножа й на масив ГСП (площину зсуву), викликаючи реакції масиву й ножа на елемент ґрунта  $R_1, R$  (рис. 1), котрий почав рухатись. Напрямок реакцій визначається тертям при взаємодії елемента стружки з масивом і ножем, у результаті чого реакцій ( $\vec{R}, \vec{R}_1$ ) відхиляються на кут тертя у бік, протилежний рухові: тоді з трикутника сил впливає:

$$\begin{cases} R = L \cdot h \cdot \gamma \cdot v_M^2 \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \cos \rho}{\sin(\alpha + x) \cdot \sin(\alpha + \delta + \rho + x)}; \\ R_1 = L \cdot h \cdot \gamma \cdot v_M^2 \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \sin(x + \alpha + \delta - \frac{\pi}{2})}{\sin(\alpha + x) \cdot \sin(\alpha + \delta + \rho + X)}. \end{cases} \quad (14)$$

Тут  $\rho, \delta$  – кути тертя ГСП по ГСП й ГСП по ножу.

Горизонтальні і вертикальні силні зусилля  $R, R_1$  запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} R_r = R \cdot \sin(\alpha + \delta); R_b = R \cdot \cos(\alpha + \delta); \\ R_{1r} = R_1 \cdot \sin(\rho + x); R_{1b} = R_1 \cdot \cos(\rho + x). \end{cases} \quad (15)$$

У випадку руйнування ГСП з випереджаючого тріщиною (відрив) пласт ґрунту, який надходить на ніж, практично не деформується, тому з достатньою точністю, можна вважати швидкості руху пласта й машини рівним. Абсолютна швидкість руху пласта (рис. 2):

$$v_a = \sqrt{v_n^2 + v_M^2 - 2v_M \cdot \cos \alpha} = 2v_M \cdot \sin(\alpha/2), \quad (16)$$

Кут відхилення швидкості  $v_a$  від горизонталі  $x = \pi/2 - \alpha/2$ . Зусилля  $F$  визначиться виразом:

$$F = 2 \cdot L \cdot h \cdot \gamma \cdot v_M^2 \cdot \sin(\alpha/2). \quad (17)$$

У зв'язку з тим, що довжина тріщини відриву у процесі різання ГСП змінюється, змінюється й напрямок пласта, а відповідно, реакцій  $R_1$ . Для знаходження середніх значень реакцій приймаємо напрямок  $R_1$  середнім між крайніми напрямками: руху машини й руху пласта, тобто під кутом  $\alpha/2$  до горизонталі. Тоді з плану сил можна отримати (рис.2):

$$R = \frac{2 \cdot L \cdot h \cdot \gamma \cdot v_M^2}{\cos(\delta + \frac{\alpha}{2})};$$

$$R_1 = 2 \cdot L \cdot h \cdot \gamma \cdot v_M^2 \cdot \sin(\alpha/2) \cdot \text{tg}(\delta + \alpha/2). \quad (18)$$

Вертикальні та горизонтальні силні зусилля  $R_1, R$  запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} R_r = R \cdot \sin(\alpha + \delta); R_b = R \cdot \cos(\alpha + \delta); \\ R_{1r} = R_1 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}. \end{cases} \quad (19)$$

На рис. 3 подані залежності швидкісного опору від параметрів різання (швидкість й кут різання) і характеристик механічних властивостей ГСП (кути внутрішнього та зовнішнього тертя) для різних схем руйнування ГСП. Швидкісний опір при швидкостях різання ГСП до 1 м/с незначний, у доволі несприятливих умовах (кут різання  $\alpha = 60^\circ$ , кут зовнішнього тертя  $\delta = 30 \dots 40^\circ$ ) він досягає для глибини різання 10 см (0,8...1,0) кН на метр довжини ножа. Вище при швидкості 2 м/с швидкісний опір складає (1,6...2) кН на метр довжини ножа, що дає при середній довжині ножа МТА (2...2,5) м додаткове

навантаження (4...6) кН (20% тягового зусилля трактора класу 30 кН).

Вплив швидкості різання ГСП на опір різанню враховується за методикою Ю. О. Ветрова залежністю [1]:

$$P_v = k_v \cdot P + R_r, \quad (20)$$

де:  $k_v$  – експериментальний коефіцієнт [1];  $P$  – середнє максимальнє зусилля різання при швидкості різання, близькій до нуля;  $R_r$  – складова швидкісного опору, яка визначається у залежності від виду руйнування ГСП виразами (15) й (19).

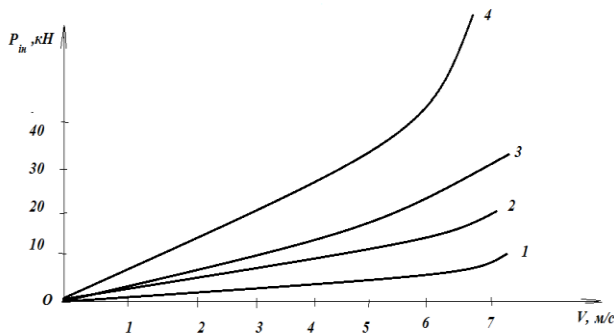


Рис. 3. Залежність інерційної складової  $P_{ін}$  від швидкості  $v$  й кута різання  $a$ :

1 –  $a=20^\circ$ ; 2 –  $a=40^\circ$ ; 3 –  $a=60^\circ$ ; 4 –  $a=90^\circ$ .

Fig. 3. The dependence of the inertial component  $P_{ін}$  speed  $v$  and angle cutting  $a$ .

### Висновки

1. Обґрунтована фізико-механічна й металатична модель для аналізу взаємодії робочих органів сільськогосподарських машин з оброблюваним ґрунтом, яка визначає зв'язки між характеристиками ГСП й періодичністю зміни зусиль його різання.

2. Встановлені основні закономірності та співвідношення між параметрами ГСП й кінематично-силовими параметрами робочих органів машин для різних способів руйнування ґрунту.

3. Встановлена залежність інерційної складової сили різання ГСП від кута різання й швидкісного опору при різних швидкостях різання ГСП.

4. Отримані у роботі результати можуть бути у подальшому використані для уточнення й вдосконалення інженерних методів розрахунку кінематично-силових параметрів робочих органів ґрунтообробних машин як на стадіях їх проектування / конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

### Список літератури

1. Ветров Ю. А. Різання ґрунтів землеройних машинами. Москва. Машиностроения, 1971. 357 с.
2. Ничке В. В. Надежность прицепного и навесного оборудования тракторов. Харьков: гезд-во при ХГУ издательского объединения «Вища школа». 1985. 152 с.
3. Руднев В. К. Капание ґрунтов землеройно-

транспортными машинами активного действия. Харьков: гуд-во при ХГУ, 1974. 143 с.

4. Холодов А. М. Основы динамики землеройно-транспортных машин. Москва. Машиностроения, 1968. 156 с.

### References

1. Vetrov Yu. A. (1971). Soil cutting by earth-moving machinery. Moscow. Mechanical Engineering. 357.
2. Nitscheka V. V. (1971). Reliability of trailed and mounted tractor equipment. Kharkov. State.
3. Rudnev V. K. (1974). Dripping soil with earth moving transport vehicles. Kharkov: buzz at KSU, 1974. 143.
4. Kholodov A. M. (1968). Fundamentals of the dynamics of earth moving vehicles. Moscow. Mechanical Engineering. 156.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН С  
ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОЧВОЙ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОЧВЫ  
И ПЕРИОДИЧНОСТЬЮ СМЕНЫ УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ

Ю. В. Човнюк, Ю. О. Гуменюк, И. Н. Сивак

**Аннотация.** В работе проведено определение связей между характеристиками обрабатываемого ґрунта и периодичностью изменения усилий резания. При разрушении почвы сельскохозяйственного назначения (ПСН) сдвигом продолжительность цикла разрушения определяется скоростью машинно-тракторного агрегата (МТА) и деформацией ґрунта в направлении резки, достаточно для смещения элемента по поверхности скольжения. В связи с высокими скоростями деформирования способность ПСН сопротивляться деформациям оценивается динамическим коэффициентом деформации. Создание новых энергонасыщенных, скоростных базовых тракторов и тягачей вызывает повышение рабочих скоростей агрегированных с ними машин. Учитывая, что чем МТА в большинстве случаев можно представить в виде простого (двугранного) клина, найденный влияние скорости на сопротивление копанию ПСН простым клином.

**Ключевые слова:** концепция, анализ, взаимодействие, рабочий орган, сельскохозяйственные машины, почва, обработка, связи, определения, характеристика почвы, периодичность, изменение, усилия, резки.

CONCEPTUAL BASES OF ANALYSIS  
OF INTERACTION BETWEEN WORKING BODIES  
OF AGRICULTURAL MACHINES AND TREATED  
SOIL: DETERMINING THE LINKS BETWEEN SOIL  
CHARACTERISTICS AND CHANGE OF CHANGE

I. M. Sivak, Yu. V. Chovnyuk, Yu. O. Gumenyuk

**Abstract.** In this work, the determination of the connections between the characteristics of the cultivated soil and the frequency of the change in the cutting effort

is carried out. In the case of destruction of agricultural soil (AS) with a displacement, the duration of the cycle of destruction is determined by the speed of the machine-tractor unit (MTA) and the deformation of the soil in the direction of cutting, sufficient for the displacement of the element along the surface of the slide. Due to high deformation rates, the ability of AS to resist deformations is estimated by the dynamic deformation coefficient. Creation of new energy-intensive, high-speed basic tractors and tractors causes increase of working speeds of aggregated with them cars. Taking into account that the MTA knife can, in most cases, be presented as a simple (double-sided) wedge, the effect of the speed on the AS digging resistance is found by a simple wedge.

**Key words:** concept, analysis, interaction, working body, agricultural machinery, soil, processing, communication, definition, soil characteristics, periodicity, change, effort, cutting.

**I. М. Сівак** ORCID 0000-0002-6297-587X.

**Ю. В. Човнюк** ORCID 0000-0003-1889-0876.

**Ю. О. Гуменюк** ORCID 0000-0001-8203-5749.

