Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 1, 133-139
ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

DOI: 10.31548/machenergy.2019.01.133-139

УДК 624.236

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ СУЧАСНОЇ ТЕОРІЇ РУЙНУВАННЯ ГРУНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ. КОНТЕНТ-АНАЛІЗ ТА КРИТИЧНИЙ ПОГЛЯД НА ТЕОРІЮ АКАДЕМІКА В. Л. БАЛАДІНСЬКОГО

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

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Кореспонденція авторів: sivakim@ukr.net.

Історія статті: отримано – січень 2018, акцептовано – травень 2019.
Бібл. 6, рис. 8, табл. 0.

Анотація. Проведений критичний контент - аналіз теорії академіка В. Л. Баладінського, у якій викладені основи сучасної теорії руйнування грунтів і гірських порід. На відміну від діючих теорій, ця теорія у лінійному наближенні враховує тривалість руйнування, енергію та швидкість навантаження, швидкість хвиль деформації у масиві й зміну властивостей грунтів при навантаженнях. При таких пружних коливаннях ці рівняння, що описують динамічні процеси у грунтах, які руйнуються, є лінійними, а при скінченних залишкових деформаціях – нелінійні. Крім того, вказана вище теорія В.Л. Баладінського лише у першому наближенні враховує вплив фронту хвилі (точніше, форми цього фронту),яка утворюється у процесі руйнування оброблюваного грунту. Проте розвинутий підхід визначає тоже напруги між робочим органом і фронтом хвилі й може бути використання для оцінки швидкості розповсюдження тріщин при руйнуванні грунту. Це дозволяє, у свою чергу, визначити режимні та конструктивні параметри одно – та багатоелементних робочих органів земле – (грунтообробних машин, котрі використовуються у сільському господарстві, виходячи із необхідних об'ємів руйнування грунту.

Ключові слова: концепція, основи, теорія, руйнування, грунти сільськогосподарського призначення, контент-аналіз, критичні погляди, теорія академіка В. Л. Баладінського.

Постанова проблеми

Раніше процес руйнування грунтів (у т.ч.сільськогосподарського призначення – ГСП) розглядався тільки у зоні контакту робочого органу (РО) з грунтом, обумовленого глибиною входження (δ) РО у грунт, без урахування дефортованої зони перед РО, в якій розповсюджується тріщини і з'являються осередки зрунтованої частини масиву (рис. 1). Швидкість розповсюдження хвиль деформацій U в цій зоні не враховувалась.

Другим параметром , що не приймався до уваги, є тривалість руйнування t-час від початку навантаження до сколу грунту. Відсутність тривалості руйнування у різних межах методах розрахунку сил опору грунту не дозволяє оцінювати різні за швидкістю робочі процеси, енергоємність повільних і швидкопливнних методів руйнування. Сама швидкість V_0 РО в окремих розрахунках оцінювалась коригуючими коефіцієнтами, що не відповідає реакції різних грунтів на швидкість навантаження. І зовсім неприпустимими у світі сучасних уявлень є ігнорування зміною фізико-механічних властивостей під дією різних за швидкістю навантажень.

Густина грунту ρ, пористість n, зчеплення c, вологість w,коефіцієнт внутрішнього (φ) і зовнішнього тертя (f) під дією повільних і швидкоплинних процесів змінюються із зміною не тільки швидкості, а також і енергії навантаження.

У всіх без винятку попередніх методах розрахунку навантажень на РО при руйнуванні грунтів розглядається практично один вид навантажень – постійна діюча, без будь-яких коливань, сила, так зване «силове» різання.

У той же час процес руйнування складається з безліч сколів, які змінюються від нульової або близької до неї величини до максимальної, що відповідає границі міцності грунтів, яка залежить від умов навантаження і форми РО.

З іншого боку, великий клас землерийної техніки та ґрунтообробних машин, як будівельної, гірничої, меліоративної, так і сільськогосподарської і спеціальної, працює на принципах ударного, вібраційного, вибухового, теплового чи комбінованих принципах, що потребує врахування умов руйнування не тільки при навантаженні, але і при швидкому зніманні навантаження з масиву грунту.

Роботи академіка В.Л. Баландінського та інших вчених дозволяють врахувати реальні умови процесу руйнування і зняти ті обмеження, що були прийняті у попередніх дослідженнях.

Проте, для узагальнення, корекції та вдосконалення теорії руйнування грунтів і гірських порід академіка В. Л. Баладінського слід спочатку провести її детальний та всебічний аналіз з критичної точки зору.

Аналіз останніх досліджень

Теорія руйнування грунтів і порід (у подальшому - грунтів або грунтів сільськогосподарського призначення (ГСП)) пройшла дослід довгий шлях свого становлення починаючи Леонардо-да-Вінчі, який ще у XV столітті розробив принципову схему екскаватора-драглайна і академіка В. П. Горячкіна, що розділив силу опору грунту на три види: 1) силу опору від тертя РО впродовж дна прорізу; 2) силу опору деформуванню прошарку зрізаного грунту; 3) силу опору відкидання цього прошарку; Е. Динглінчера і І. Ратьє, що сформулювали положення про критичну глибину різання і про утворення ущільненого ядра на РО; професора М.Г. Добровського, який розробив принципи копання грунтів; професора А.М. Зеленіна, який зв`язав закономірності різання грунтів з параметрами плоского ущільнюючого пуансона (ударника) професорів М. Протод`яконова по різанню вугілля та М.І. Гальперіна по руйнуванню вапняків; І.О. Тер-Азар'єва по різанню каміння; члена кореспондента АН України Ю.О. Вєтрова по створенню плоскої моделі процесу різання грунтів ці основні положення фізики руйнування грунтів доповнювались у роботах різних вчених протягом багатьох років, досягнуті значні успіхи у розробці методів розрахунку параметрів процесу руйнування і РО (1–6). Всі ці роботи дозволяють перейти до наступного етапу створення сучасної теорії руйнування грунтів, який має врахувати реальні умови процесу руйнування і зняти ті обмеження, що були прийняті у попередніх дослідженнях.

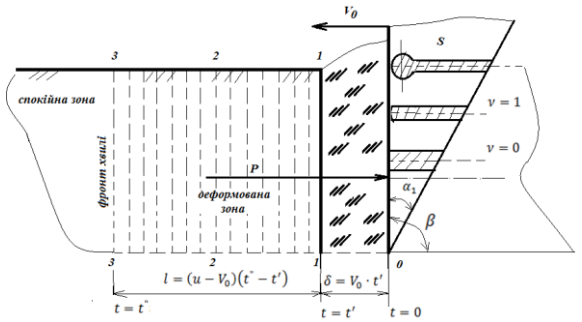

Рис. 1. Схема навантаження грунтового масиву робочого органу землерийної техніки.

Fig. 1. Loading the soil mass of the working body of earth-moving equipment.

Мета дослідження

Мета роботи полягає у критичному контент-аналізі теорії руйнування грунтів (сільськогосподарського призначення) академіка В.Л. Баладінського задля її узагальнення, вдосконалення і розширення що дає змогу більш адекватно врахувати реальні умови процесу руйнування і зняти ті обмеження, котрі були прийняті в попередніх дослідженнях.

Результати досліджень

Усі РО землерийної техніки (яка використовується й у сільському господарстві) можуть бути зведені до трьох основних які породжують різні види хвиль деформації: плоский (коефіцієнт виду хвилі ν=0), циліндричний (усі види гострих клинових РО затуляються після незначного часу роботи і приходять до цього виду, ν=1), сферичний (ν=2) (рис. 1).

Розглянемо визначення напруги у масиві грунту при його навантаженні, враховуючи усі доповнення, що були викладені вище. Стан грунту (грунту сільськогосподарського призначення - ГСП, при цьому визначається законом збереження маси:

$$\frac{\partial(\rho,\gamma_2,\gamma_2)}{\partial t} + U\cdot\frac{\partial(\rho,\gamma_1,\gamma_2)}{\partial \times} + \rho\cdot\gamma_1\cdot\gamma_2\cdot\frac{\partial u}{\partial \times} - V\cdot\frac{U\cdot\partial\cdot\gamma_1\cdot\gamma_2}{\times} = 0, \quad (1)$$

законом збереження кількості руху

$$\frac{\partial u}{\partial t}\cdot\rho\cdot\gamma_1\cdot\gamma_2 + U\cdot\frac{\partial U}{\partial \times}\cdot\rho\cdot\gamma_1\cdot\gamma_2 - \frac{\partial t}{\partial \times} - \frac{V}{\times}\cdot(\partial + \bar{\partial} - \frac{2C}{f})\sin\varphi = 0, \quad (2)$$

Законом поведінки грунту при його навантаженні (реальною діаграмою Найрула ∂ – деформація ε)

$$\partial = f(\varepsilon), \quad (3)$$

І відношенням головних нормальних ∂ та дотичних $\bar{\partial}$ напруг

$$\bar{\partial} = K\cdot\partial. \quad (4)$$

У цих рівняннях прийнято: $\gamma_1 = 1 - n$, $\gamma_2 = 1 + W$.

При малих пружних коливаннях ці рівняння лінійні, а при скінченних залишкових деформаціях – нелінійні. Розлянемо задачу , коли початковий переріз у грунті переміщується зі швидкістю V за час t. У найбільш доступній формі для дослідження системи рівнянь (1)-(4) буде мати вигляд

$$\begin{cases} \frac{\partial\rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial \times} + \frac{V}{\times}\cdot\rho\cdot V = 0; \\ \rho\cdot\frac{\partial V}{\partial t} + \rho\cdot V\cdot\frac{\partial V}{\partial \times} = -\frac{\partial t}{\partial \times} - \frac{V}{\times}\cdot(1-K)\cdot\partial; \\ \partial = f\left(\frac{\rho-\rho_0}{\rho}\cdot 100\%\right), \end{cases} \quad (5)$$

де $\rho(\times, t)$ – густина грунту; ρ_0 – початкова густина грунту; K та V – постійні; V(x,t) – швидкість переміщення часток грунту при навантаженні; $\overline{b(}$x,t) = K$\cdot b$(x,t) – компоненти напруг у грунті у напрямку переміщення хвилі та у перпендикулярному до нього; f- функція, що відповідає реальній діаграмі деформування b = $f(\varepsilon)$.

У подальшому розглянемо метод розв'язку системи (5) методом академіка В.Л. Баладінського (у другій частині дослідження буде представлений інший метод розв'язку нелінійної системи диференціальних рівнянь у частинних похідних (5)).

Якщо зміна величини енергії за одиницю часу при переході через фронт хвилі мала, тоді на фронті хвилі повинні виконуватись співвідношення:

$$\begin{cases} (\rho_2 - \rho_1)\cdot U = -(\rho\cdot V)_1 + (\rho\cdot V)_2; \\ [(\rho V)_2 - (\rho V)_1]\cdot U = -(b + \rho V^2)_1 + (b + \rho V^2)_2 \end{cases} \quad (6)$$

де U - швидкість хвилі; ρ_1 - густина грунту позаду фронту; ρ_2 - густина грунту перед фронтом; V_1та V_2 - швидкості часток грунту відповідно позаду і перед фронтом; b - напруга у грунті.

Перед фронтом хвилі знаходяться спокійна зона, для якої $\rho_2 = \rho_0$; $V_2 = 0$; $b_2 = 0$. Тому система (6) має вигляд:

$$\begin{cases} (\rho_0 - \rho_1) \cdot U = -\rho_1 \cdot V_1, \\ -\rho_1 V_1 \cdot U = -b_1 - \rho_1 \cdot V_1. \end{cases} \quad (6^*)$$

До системи (6) додамо залежність між відносною деформацією (у %) та напругою:

$$b_1 = f(\varepsilon_1), \quad (7)$$

а також відносну деформацію як функцію густини:

$$\varepsilon_1 = \frac{\rho_1 - \rho_0)}{\rho_1} \cdot 100\% . \quad (8)$$

Таким чином, граничні умови на фронті хвилі визначаються з системи рівнянь:

$$\begin{cases} (\rho_1 - \rho_0) \cdot U = \rho_1 \cdot V_1, \\ \rho_1 \cdot V_1 \cdot U = b_1 + \rho_1 \cdot V_1^2, \\ b_1 = f(\varepsilon_1), \\ \varepsilon_1 = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1} \cdot 100\% . \end{cases} \quad (9)$$

Далі доцільно всі величини U, ρ_1, V подати як фуекції від ε_1 , тоді

$$U = \frac{\rho_1 \cdot V_1}{(\rho_1 - \rho_0)} = \frac{100 \cdot V_1}{\varepsilon_1}, \rho_1 = \frac{100 \cdot \rho_0}{(100 - \varepsilon_1)} \quad (10)$$

Підставляючи до другого рівняння системи (9) величину U з першого рівняння цієї системи , одержимо:

$$\frac{\rho_1^2 \cdot V_1^2}{(\rho_1 - \rho_0)} - \rho_1 \cdot V_1^2 = b_1 \text{, або } \frac{\rho_0 \cdot \rho_1 \cdot V_1^2}{(\rho_1 - \rho_0)} = b_1. \quad (9^*)$$

Враховуючи (7) та (8) , будемо мати:

$$\frac{100 \cdot \rho_0 \cdot V_1^2}{\varepsilon_1} = f(\varepsilon_1). \quad (10)$$

У загальному випадку швидкість V залежить від ε_1; для визначення цієї залежності розглянемо два перших рівняння системи (5), які показують поведінку грунту між РО, що переміщується з швидкістю V_0, і фронтом хвилі. Оскільки для реальних грунтів $0 \leq \varepsilon_1 \leq 1$, з з рівняння (10) видно, що густина грунту у цій зоні мало змінюється, хоча значно відрізняється від початкової ρ_0. Тому перше рівняння системи (6) залишимо у вигляді:

$$\rho \cdot \frac{\partial V_1}{\partial x} + \frac{V}{x} \cdot \rho \cdot V_1 = 0, \text{або оскільки}$$

$$\rho \neq 0, \text{тоді } \frac{\partial V_1}{\partial x} = \frac{V}{x} \cdot V_1. \quad (11)$$

При граничних умовах $V_0 = V_1 (x = V_0 \cdot t, t)$ при $t \geq 0$, швидкість часточок грунту після деяких підстановок [3] визначається виразами:

$$V_1(x,t) = V_0 (\frac{V_0 \cdot t}{x})^v; V_1 = (V_0) \frac{v}{(\varepsilon_1)^{v+}} / (100)^{\frac{v}{v+1}} \quad (12)$$

Для визначення ε_1 рівняння (12) підставимо у (11):

$$\rho_0 \cdot V_0^2 \cdot (\varepsilon_1)^{\frac{v-1}{v+1}} / (100)^{\frac{v-1}{v+1}} = f(\varepsilon_1). \quad (13)$$

Тоді для кожного виду РО рівняння для визначення ε_1 набувають вигляду:

при V=0 $f(\varepsilon_1) = \frac{100 \cdot \rho \cdot V_0^2}{\varepsilon_1}$;

при V=1 $f(\varepsilon_1) = \rho_0 \cdot V_0^2$;

при V=2 $f(\varepsilon_1) = \frac{\rho_0 \cdot V_0^2 \cdot \varepsilon_1^{1/3}}{100^{1/3}}$.

Розв'язок (13) дозволяє для визначення відносної деформації подати її як абсцису точки C_0перетину графіка функції (рис. 2), що стоїть у лівій частині рівняння, з реальною діаграмою $b = f(\varepsilon)$.

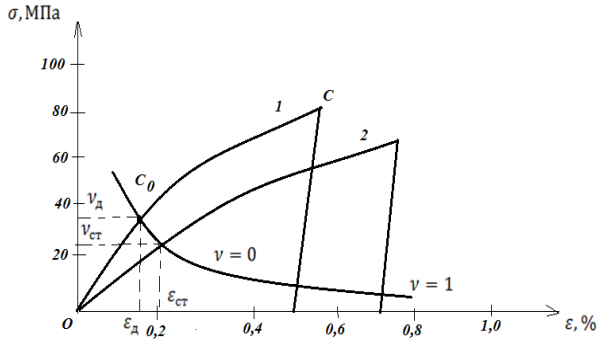

Рис. 2. Графік функції $b = f(\varepsilon)$ та (13).
Fig. 2. Graph of function $b = f(\varepsilon)$ and (13).

Для визначення напруги у деформованій зоні розглянемо друге рівняння системи (5) разом з (10) та (12), що дає для $b_1(x,t)$ диференційне рівняння [3]:

$$\frac{\partial b_1}{\partial x} - \frac{v}{x} \cdot (1 - K) \cdot b_1 = g(x,t), \text{де } g(x,t) = \frac{\rho_0 \cdot V_0^2 \cdot v}{x} \cdot \left[(\frac{V_0 \cdot t}{x})^{2v} - (\frac{V_0 \cdot t}{x})^{v-1} \right]. \quad (13^*)$$

Послідовність розв'язування останнього рівняння (13^*) вказана у роботі [3]. Після деяких перетворень будемо мати:

$$b_1(x,t) = A \cdot (\frac{t}{x})^{v-1} + B \cdot (\frac{t}{x})^{2v} + C \cdot (\frac{t}{x})^{v \cdot (1-K)}$$

де: $A = \frac{\rho_0 \cdot v \cdot V_0}{(v \cdot K - 1)}$; $B = \frac{\rho_0 \cdot V_0^{2 \cdot (v+1)}}{(1+K)}$; $C = \frac{\partial_\phi - A \cdot U^{+v} - B \cdot U^{-2v}}{U^{v \cdot (K-1)}}$.(14)

При цьому $\partial_\phi = f(\varepsilon_1)$, де ε_1- розв'язок рівняння (13). Рівняння (14) визначає поле напруги $b_1(x,t)$між РО і фронтом хвилі і може бути використане для оцінки швидкості розходження тріщин при руйнуванні U_T (рис.3), що дозволяє визначати реантимні та конструктивні параметри одно- і багатоелементних РО машин , виходячи із необхідних об'ємів руйнування до конкретної величини на фронті хвилі.

Підрахувавши похідні: $\frac{\partial \gamma}{\partial t} = -\frac{1}{t} \cdot Z \cdot \frac{d\gamma}{dz}$; $\frac{\partial \gamma}{\partial x} = \frac{1}{x} \cdot z \cdot \frac{d\gamma}{dt}$.,

де: $\gamma = \rho_1 \cdot V$ або b, і підставивши їх у (5), одержимо систему рівнянь:

$$\begin{cases} (V - Z) \cdot \frac{d\rho}{dz} + \rho \cdot \frac{dV}{dz} + \frac{v}{z} \cdot \rho \cdot V = 0; \\ (V - Z) \cdot \rho \cdot \frac{dV}{dz} = -\left[\frac{d\partial}{dt} + \frac{v \cdot (1-K)}{z} \cdot \gamma \right] \end{cases} \quad (15)$$

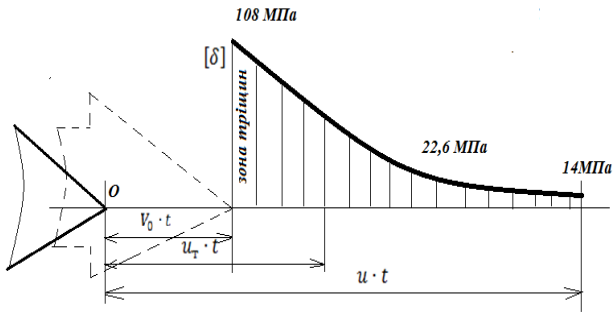

Рис. 3. Схема розповсюдження тріщин.
Fig. 3. Scheme of crack propagation.

У окремих розрахунках потрібно визначити зміну густини у деформованій зоні. Для цього розглянемо задачу інтегрування системи (5) у реальному випадку, коли густина грунту змінюється від найбільшої (ядро) на РО до конкретної величини на фронті хвилі.

Підрахувавши похідні:

$\frac{\partial\gamma}{\partial t} = -\frac{1}{t}\cdot z\cdot\frac{d\gamma}{dz}; \frac{\partial\gamma}{\partial x} = \frac{1}{x}\cdot z\cdot\frac{d\gamma}{dt}.$

Розв'язок першого рівняння системи (15) відносно V(t) має вид:

$$V(z) = V^*\cdot\left[\int_{z0}^{z}\left(\frac{z}{\rho V^*}\right)\cdot\frac{d\rho}{dz}dt + C_1\right], \qquad (15^*)$$

де : V^*- розв'язок відповідного однорідного рівняння; C_1 - довільна стала величина.

Для V^* маємо рівняння:

$$V^* = exp\left\{-\int_{z0}^{z}\left(\frac{1}{\rho}\cdot\frac{d\rho}{dz} + \frac{v}{z}\right)dz\right\} = \frac{1}{z^v\cdot\rho}, \quad (15^{**})$$

Звідки:

$$V(z)=\frac{1}{z^v\cdot\rho}\cdot\left[\int_{z0}^{z}\left(z^{v+1}\cdot\frac{d\rho}{dz}\cdot dz + C_1\right)\right], \quad (15^{***})$$

де: $Z_0 = \frac{V_0\cdot t}{t} = V_0$.

Стала C_1 визначається за умови $V(t_0) = V_0$, таким чином:

$$V_0 = \frac{C_1}{z_0^v\cdot\rho_s}, C_1 = V_0^{v+1}\cdot\rho_s. \qquad (15^{****})$$

У останніх виразах $\rho_s = \rho(z_0)$ – величина густини на поверхні S робочого органу (РО).

Звідси:

$$V(z) = \frac{1}{z^v\cdot\rho}\cdot\left[\left(\int_{z0}^{z} z^{v+1}\cdot\frac{d\rho}{dz}\cdot dz + V_0^{v+1}\cdot\rho_s\right)\right]. \quad (16)$$

Інтегруючи по частинам рівняння (16) , одержимо:

$$V(z)=z-\frac{(v+1)}{(z^v\cdot\rho)}\cdot\int_{z0}^{z}(\rho\cdot z^v)dz. \qquad (17)$$

Якщо $\rho = const$, тоді : $V(z) = V_0\cdot(\frac{V_0\cdot t}{x})^v$, що відповідає розв'язку (12).

Для швидкості V(z) формули (17) одержимо їх оцінки, якщо відомі найбільше ρ_{max} і найменше ρ_{min} значення густини.

Верхня оцінка: $V(z)=z-\frac{(v+1)}{(z^v\cdot\rho)}\cdot\int_{z0}^{z}(\rho\cdot z^v)dz \le z - \frac{\rho_{min}}{\rho_{max}}\cdot\left(z - \frac{V_0^{v+1}}{z^v}\right) = V_в(z)$.

Нижня оцінка має вигляд: $V(z)\ge z - \frac{\rho_{max}}{\rho_{min}}\cdot\left(z - \frac{V_0^{v+1}}{Z^v}\right) = V_H(z)$.

Окремо розглянемо випадки для плоского (V=0), циліндричною (V=1) і сферичного (V=2) рухів.

Плоский рух: позначимо верхні та нижні оцінки

$$К_в = \frac{\rho_{max}-\rho_{min}}{\rho_{max}}, K_н = \frac{\rho_{min}-\rho_{max}}{\rho_{min}}.$$

Тоді: $V_в(z) = K_в\cdot z + \frac{\rho_{min}\cdot V_0}{\rho_{max}}; V_н(z) = K_H\cdot Z + \frac{\rho_{max}\cdot V_0}{\rho_{min}}$.

Графіки функцій V_H та $V_в$ є прямими, кут між якими $\alpha \to 0$ при $\rho_{max}/\rho_{min} \to 1$ (рис.4). Це свідчить про те, що V=(z)=V_0, якщо густина грунту стала або практично стала (на рис.4 область розв'язку заштрихована).

Циліндричний рух:

$$V_в(z) = K_в\cdot z + \frac{\rho_{min}\cdot V_0^2}{\rho_{max}\cdot z};$$

$$V_H(z) = K_H\cdot z + \frac{\rho_{max}}{\rho_{min}}\cdot\frac{V_0^2}{z}.$$

Графіки функцій показані на рис.5. Якщо густина стала , тоді $V(z) = \frac{V_0^2}{Z}$.

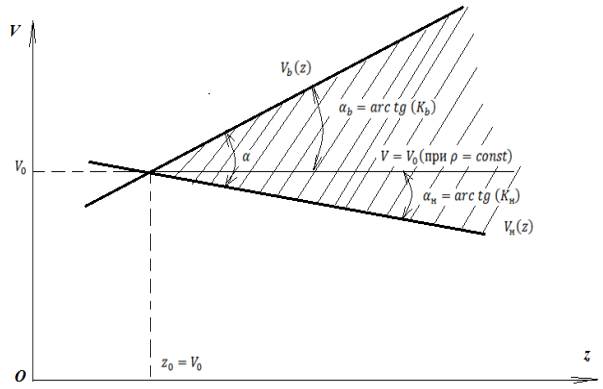

Рис. 4. Область розв'язку $V = f(z)$ для плоского руху.

Fig. 4. Scope of solution V=f(z) for planar motion.

Сферичний рух: $V_в(z) = K_в\cdot(z) + \frac{\rho_{min}\cdot V_0^3}{\rho_{max}\cdot z^2}$; $V_H(z) = K_H\cdot(z) + \frac{\rho_{max}\cdot V_0^3}{\rho_{min}\cdot z^2}$. Графіки функцій $V_в(z)$ та $V_H(z)$ у цьому випадку подані на рис. 6. При цьому для сталої густини

$$V(z) = V_0^3/z^2.$$

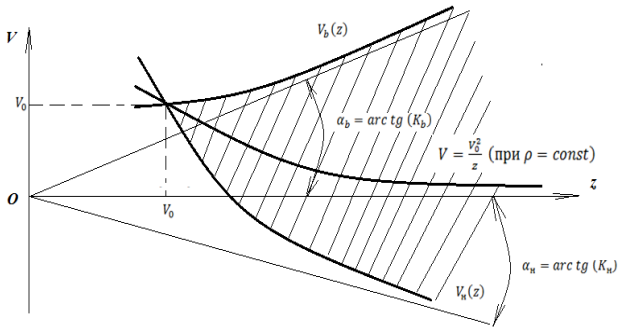

Рис. 5. Область розв'язку $V = f(z)$ для циліндричного руху.

Fig. 5. Scope of solution V=f(z) for cylindrical movement.

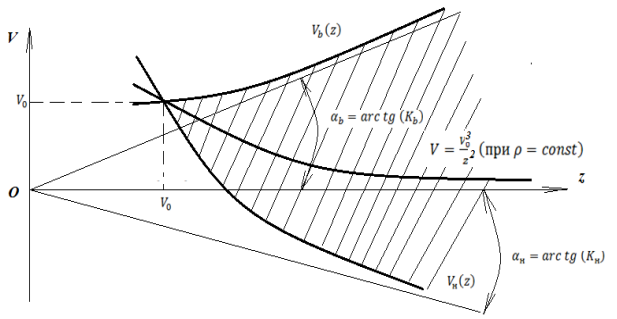

Рис. 6. Область розв'язку $V = f(z)$ для сферичного руху.

Fig. 6. Scope of solution V=f(z) for spherical movement.

Розглянемо друге рівняння системи (15) і одержимо після деяких перетворень (більш докладно викладених у [2, 3] нелінійне інтегральне рівняння:

$$\rho = \rho_0 \cdot \Big[1 + \varphi \cdot (\alpha \cdot z^{1-v} \cdot x - \alpha^2 \cdot z^{-2v-1} \cdot \rho \cdot x^2 - \alpha z^{v \cdot k - v} \cdot \int_{z0}^{z} z^{v-v \cdot K+1} \cdot \rho \cdot dz + \beta \cdot z^{v \cdot K - v} \cdot \int_{z0}^{z} z^{-v \cdot K} \cdot x dz - \gamma \cdot z^{v \cdot K - v} \cdot \int_{z0}^{z} z^{-v-v \cdot K+1} \cdot \rho^{-1} \cdot x^2 dz + f(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_s} \cdot 100\%) \cdot (\frac{z}{V_0})^{v \cdot (K-1)}\Big],$$

Або у операторній формі

$\rho = \mathrm{A}\rho$, де $\varepsilon = F(b)$ – зворотна функція до

$$b = f(\varepsilon), \text{й } \varphi(b); \alpha_b == \frac{F(b)}{[100\% - F(b)]};$$

$$\rho z^v dz;\ \alpha = v + 1;$$

$$X(z) = \int_{z0}^{z} \beta = (v \cdot K)^2 + V \cdot K \cdot (v+1); \gamma = = v \cdot K \cdot (v+1)^2$$

b_s- величина напруження на поверхню S РО.

Розглянемо замкнену область руйнування (рис.7):

$$S^* = \{\rho_0 \le \rho_5 \le 2\rho_0; V_0 \le z \le V_0 + h\}.$$

Розміри області між РО і фронтом хвилі визначаються густиною $\rho > \rho_0 > 0$, і ця густина для реальних грунтів (ГСП) не перевищує $2\rho_0$,але принцип доказу не змінюється, якщо густина буде більша за $2\rho_0$.

Оператор А визначений на множині ω неперервних на відрізку $[V_0, V_0 + h]$ функцій $\rho(z) \le \bar{S}$. У зв′язку з тим, що $\varphi(b) < 1$, оператор А відображає ω у собі: $\mathrm{A}(\rho)\epsilon\omega$, $\mathrm{A}(\rho)\epsilon S^*$, якщо $\rho\epsilon\omega$.

У роботі [3] показано , що якщо відрізок $[V_0, Z]$ достатньо малий, тоді: А – оператор стискання, який для заданої швидкості

V_0 та величини ρ_S , що відповідає умові $\rho_0 \le \rho_S \le 2\rho_0$, тоді система (15) має на відрізку $[V_0, t]$ єдиний автомодельний розв'язок $\rho(z)$і $V(z)$. При цьому $b^* = Z^{v \cdot (K-1)}$.

Розв'язок $\rho(z)$ може бути одержаний як границя послідовності: $\rho_{n+1} = A\rho_n = \rho_0 \cdot \cdot [1 + \varphi(bn)], n = 0,1,2, \ldots$

Реалізація такого підходу затруднюється тим , що послідовні наближення можуть привести до квадратур, які не беруться. У роботах [2,3] з цього приводу наведено чисельний алгоритм знаходження $\rho(z)$і $V(z)$.

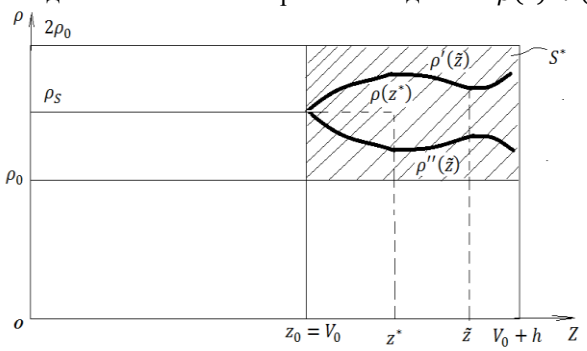

Рис. 7. Границі зміни густини грунтів при навантаженні.

Fig. 7. The limits of variation of the density of the soil under load.

Руйнування грунтів при деформаціях відриву виявляється у міцних породах при імпульсному навантаженні (удари, вібрації, тощо), коли після сколу РО швидко відходить назад. У цьому випадку швидкісне знімання навантаженого масиву призводить до найменш енергоємного виду руйнування – відриву . Це особливо ефективно у скельних породах , оскільки їх міцність на відрив значно менше , ніж на стиск.

Розглянемо рівняння руху стиснутої деформованої зони (ГСП) після ударного навантаження:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - 2 \cdot K_г \cdot \alpha^2 \cdot \frac{\partial U}{\partial x}, \text{де } \alpha^2 = \frac{E_р}{\rho};$$

$K_г = \frac{f \cdot K}{2}$ – коефіцієнт, що характеризує умови контакту часток ГСП на одиниці довжини стиснутої деформованої зони; визначений лінією розвантаження (рис.2); К – коефіцієнт бокового тиску (4). Розв'язання цього рівняння для випадку швидкого зняття навантаження з масиву ГСП досить складно і наведене у роботі [3], що дозволяє визначити умову (умови) розриву стиснутої зони при виході РО назад, а також тривалість розриву.

Якщо розглянути енергетичні умови руйнування грунтів [1, 5], тоді виходячи із закону збереження енергії, енергія процесу руйнування (рис.1) являє собою суму енергії розділення масиву на частини та створення нових поверхонь:

$$A_р = \frac{S \cdot l}{K_\varphi} \cdot \int_0^{\varepsilon g} f(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{S \cdot (U - V_0) \cdot t \cdot b \cdot \varepsilon}{2 \cdot K_\varphi}, \quad (18)$$

І енергію пружної деформації стиснутої деформованої зони:

$$A_с = \frac{S \cdot l \cdot \rho \cdot V_0^2}{2 \cdot K_\varphi} = \frac{S \cdot (U - V_0) \cdot t \cdot \rho \cdot V_0^2}{2K_\varphi}, \quad (19)$$

де: S - площа контакту РО з ГСП; K_φ - коефіцієнт загострення для клинового РО (при куті загострення $\varphi = 180°$ $K_\varphi = 1$).

Інтеграл у правій частині рівняння (18) є ніщо інше, як площа (рис.2),обмежена кривою OC_0, віссю ординат ∂_g і віссю абсцис ε_g- практично площа трикутника $OC_0\varepsilon_g$:

$$\int_0^{\varepsilon_g} f(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot b_g \cdot \varepsilon_g. \quad (20)$$

Сумарна енергія руйнування , згідно з (18) та (19) (рис. 1):

$$A = \frac{S \cdot (U - V_0) \cdot t \cdot K_g}{2K_\varphi},$$

де: $K_g = b_g \cdot \varepsilon_g + \rho \cdot V^2$- питомий опір грунту руйнуванню.

Тривалість сколу у одному циклі руйнування

$$t = \frac{2 \cdot A \cdot K_\varphi}{S \cdot (u - V_0) \cdot K_g}. \quad (21)$$

Сила руйнування при заглибленні РО на величину δ і створення деформованої зони l (рис.1):

$$P = \frac{S \cdot K_g \cdot (u - V_0)}{2V \cdot K_\varphi}. \quad (22)$$

Для РО багатьох землеобробних машин (екскаваторів, скреперів, бульдозерів, грейдерів та ін.):

$P = \frac{S \cdot K_g \cdot (u - V_0) \cdot \sin\beta}{2 \cdot V \cdot K_\varphi}$, де β – кут різання (рис. 8).

Сумарний об'єм ГСП у зонах руйнування і пружної деформації [4]:

$$V_c = \frac{2A \cdot U \cdot K_\varphi}{K_g \cdot (u - V_0)}. \qquad (23)$$

Розуміючи під енергоємністю відношення енергії, витраченої на руйнування та деформацію певною об'єму грунту V_c за час процесу Т до величини V_c , одержимо: $E = \frac{A}{V_c \cdot T} = \frac{K_g \cdot (u - V_0)}{2U \cdot K_\varphi \cdot T}$,

де : $T = t \cdot K_c$, K_c – кількість сколів для силового різання або число імпульсів для ударного, вібраційного, частоударного, тощо процесів руйнування (на осцилограмах – число максимумів сили опору грунту руйнуванню).

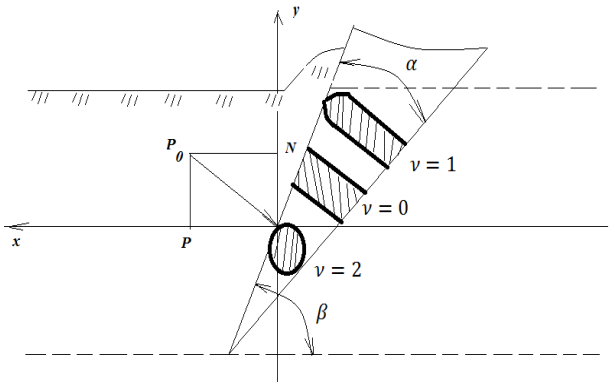

Рис. 8. Схема роботи ріжучого клинового робочого органу землеробної машини.

Fig. 8. The scheme of a cutting wedge working on machine.

Для динамічного навантаження K_c характеризується кількістю циклів навантаження для найбільш віддаленого перерізу (3-3, рис. 1) зони руйнування $K_c = \frac{l}{\delta} = \frac{U}{V_0}$;для середньої зони (2-2, рис. 1) $K_c = U/(2V_{0)}$. Та ким чином, середня енергоємність руйнування:

$$E_{Г.С.} = \frac{K_g \cdot V_0 \cdot (u - V_0)}{U^2 \cdot K_\varphi \cdot t}. \qquad (24)$$

Для інженерних розрахунків , коли швидкістю РО ($V_0 = 1 \ldots 30$ м/с) порівняно зі швидкістю розповсюдження деформації (U=200…3000 м/с) можна знехтувати , енергоємність процесів землеобробної техніки буде:

$$E_{Г.С.} = \frac{K_g \cdot V_0}{U \cdot K_\varphi \cdot t}. \qquad (25)$$

Висновки

1. Проведений критичний контент-аналіз теорії руйнування ГСП академіка В. Л. Баладінського дає можливість вдосконалити інженерні методи розрахунку опору грунтів, параметрів процесів і енергоємності у різних умовах роботи для машин статичної та динамічної дії. Вказані машини можуть бути віднесені до наступних класів: наземних , підводних, підземних для будівельних, гірничих, меліоративних, спеціальних та інших машин [1-5], котрі використовуються у сучасному сільськогосподарському виробництві при проведенні різноманітних технологічних процесів й операцій.

2. На думку авторів даної роботи подальші вдосконалення й узагальнення теорії руйнування ГСП можливі лише з використанням моделей, методів і підходів нелінійної механіки, що дозволяє вивчати процеси просторово-часової еволюції хвилеутворень, котрі супроводжують процес руйнування грунту.

Список літератури

1. *Баладинский В. Л.* Производительность и долговечность землеройных мелиоративных машин. Київ. Урожай, 1988. 150 с.

2. *Баладинский В. Л.* Машины и механизмы для подводных робот. Ленинград. Судостроение, 1979. 192 с.

3. *Баладинский В. Л.* Механизация земляных работ. Москва. Воениздат, 1985. 160 с.

4. *Баладинский В. Л.* Машины и механизмы для сельского строительства. Київ. Будівельник, 1978. 152 с.

5. *Баладинский В. Л.* Колинексная механизация на предприятиях стройиндрустрии. Київ. Будівельник, 1991. 152 с.

6. *Баладинський В. Л.* Основи сучасної теорії руйнування грунтів і гірських порід. Горні, будівельні, дорожні та меліоративні машини. 1993. Вип. 48. С. 72-83.

References

1. *Baladinsky V. L.* (1988). Productivity and longevity of earth-moving metator machines. Kyiv. Harvest, 150.

2. *Baladinsky V. L.* (1979). Machines and mechanisms for underwater robot. Leningrad: Shipbuilding, 192.

3. *Baladinsky V. L.* (1985). The mechanization of earthworks. Moscow. Military Publishing, 160.

4. *Baladinsky V. L.* (1978). Machines and mechanisms for rural construction Kyiv. Budyvelnik, 152.

5. *Baladinsky V. L.* (1991). Colinex mechanization at the enterprises of the construction industry. Kyiv. Budivelnik, 152.

6. *Baladinsky V. L.* (1993). Fundamentals of the current theory of soil and soil protection. Gorni, budelny, road and mall machinery. Vol. 48. 72-83.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ РАЗРУШЕНИЕ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ. КОНТЕНТ-АНАЛИЗ И КРИТИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА ТЕОРИЮ АКАДЕМИКА В. Л. БАЛАДИНСЬКОГО

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

Аннотация. Проведенный критический контент - анализ теории академика В.Л. Баладинського, в которой изложены основы современной теории разрушения почв и горных пород. В отличие от действующих теорий, эта теория в линейном приближении учитывает продолжительность разрушения, энергию и скорость нагрузки, скорость волн деформации в массиве и изменение свойств грунтов при нагрузках. При таких упругих колебаниях

эти уравнения, описывающие динамические процессы в почве, которая разрушается, являются линейными, а при конечных остаточных деформациях - нелинейные. Кроме того, указанная выше теория В. Л. Баладинського только в первом приближении учитывает влияние фронта волны (точнее, формы этого фронта), которая образуется в процессе разрушения обрабатываемого грунта. Однако розвинутый подход определяет тоже напряжения между рабочим органом и фронтом волны и может быть использование для оценки скорости распространения трещин при разрушении почвы. Это позволяет, в свою очередь, определить режимные и конструктивные параметры одно - и многоэлементных рабочих органов земля - (почвообрабатывающих машин, которые используются в сельском хозяйстве, исходя из необходимых объемов разрушения почвы.

Ключевые слова: концепция, основы, теория, разрушения, почвы сельскохозяйственного назначения, контент-анализ, критические взгляды, теория академика В. Л. Баладинського.

CONCEPTUAL BASES OF MODERN THEORY OF DESTRUCTION OF SOILS OF AGRICULTURAL PURPOSE. CONTENT ANALYSIS AND CRITICAL VIEW ON THEORY OF ACADEMICIAN V. L. BALADINSKY

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

Abstract. Conducted critical content - analysis of the theory of academician V. L. Baladinsky, in which the foundations of the modern theory of the destruction of soils and rocks are laid out. Unlike current theories, this theory in linear approximation takes into account the duration of destruction, the energy and loading speed, the velocity of deformation waves in the array, and the change of soil properties under stress. In such elastic oscillations, these equations describing the dynamic processes in the soils that are destroyed are linear, and in the case of finite residual deformations, they are nonlinear. In addition, the above theory of V. L. Baladinsky only in the first approximation takes into account the influence of the wave front (more precisely, the shape of this front), which is formed in the process of destruction of the cultivated soil. However, the advanced approach also determines the stresses between the working body and the front of the wave and can be used to estimate the rate of crack propagation when soil is destroyed. This, in turn, allows us to determine the regime and design parameters of single and multi-element working bodies of the earth ((soil tillage machines used in agriculture, based on the required volume of destruction of soil.

Key words: concept, foundations, theory, destruction, agricultural soil, content analysis, critical views, the theory of academician V. L. Baladinsky.

Ю. В. Човнюк ORCID 0000-0003-1889-0876.
Ю. О. Гуменюк ORCID 0000-0001-8203-5749.
І. М. Сівак ORCID 0000-0002-6297-587X.