

Трибофізичне обґрунтування зміни напружено-деформованого стану ґрунту під час дії РОГМ

В статті дано теоретичне обґрунтування трибофізичного підходу до закономірностей взаємодії в системі "РОГМ-ґрунт". При цьому отримано рівняння стану ґрунту у векторній формі, а також через поле напружень і деформацій.

середовище ґрунту, робочий орган ґрунтообробної машини, щільність сили, щільність ґрунту, коефіцієнт внутрішнього і зовнішнього тертя, напруження, деформація, стан ґрунту

Вступ. Надійність робочих органів ґрунтообробних машин (РОГМ) можна підвищити конструкторськими, технологічними та експлуатаційними методами, розробка яких передбачає дослідження закономірностей взаємодії РОГМ з ґрунтом, виявлення змін, що спостерігаються в поверхневих шарах матеріалу РОГМ та прилеглому до РОГМ середовищі ґрунту. Під час дії РОГМ на ґрунт відбувається зближення або віддалення частинок ґрунту, обумовлене зміною силової взаємодії між ними [1, 3]. При цьому на елемент ґрунту і РОГМ діє цілий комплекс сил: тяжіння, інерції, адгезії, тиску, тертя, зчеплення, які відносяться до двох груп: об'ємні та поверхневі сили. Серед них сили тяжіння та сили інерції відносяться до об'ємних сил, а решта – до поверхневих.

© В.В. Аулін, 2012

Аналіз літературних джерел свідчить, що ефективна експлуатація РОГМ неможлива без встановлення закономірності зношування РОГМ та урахування стану, комплексу властивостей і основних характеристик ґрунту, як елемента трибосистеми (ТС) "РОГМ-ґрунт" [4-8]. Дослідження закономірностей зношування РОГМ під час дії на ґрунт вимагає передусім розгляду елементів ТС як з теоретичної, так і з експериментальної точок зору напружено-деформованого стану (НДС) ґрунту, як гетерофазного середовища, побудова його трибофізичної та реологічної моделей й розрахунку основних показників та оцінки зміни властивостей.

Метою даної роботи є трибофізичне обґрунтування зміни НДС ґрунту під час дії РОГМ.

В динаміці суцільних середовищ [9, 10] зручно мати справу не з самими силами, а з щільністю їх розподілу:

$$\bar{F}_V = \lim_{\Delta m \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta m} = \frac{1}{\bar{\rho}_2} \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta V} = \frac{1}{\bar{\rho}_2} \frac{\delta R}{\delta V}, \quad (1)$$

де $\bar{\rho}_2$ – середнє значення щільності ґрунту в об'ємі ΔV ; ΔQ – масова сила; δR – звичайна ньютонівська сила, прикладена до елементарного об'єму δV ґрунту.

Аналогічно розглядають і щільність поверхневих сил:

$$\Phi_{\text{нов}} = \frac{\delta \mathcal{P}}{\delta S}, \quad (2)$$

де $\delta \mathcal{P}$, δS відповідно елемент поверхневої сили і площі.

Основна відмінність між величинами \vec{F}_V і $\vec{\Phi}_{noo}$ полягає в тому, що \vec{F}_V є однозначною векторною функцією точок простору і часу (векторне поле), а $\vec{\Phi}_{noo}$ – приймає в кожній точці простору значення залежні від орієнтації площинки.

Головні вектори і головні моменти об'ємних та поверхневих сил, прикладених до елемента ґрунту об'ємом V , відповідно дорівнюють:

$$\vec{K}_V = \int_V \bar{\rho}_z \vec{F}_m \delta V, \quad \vec{K}_S = \int_S \vec{\Phi}_{noo} \delta S; \quad (3)$$

$$\vec{M}_V = \int_V \bar{\rho}_z (\vec{F} \times \vec{F}_m) \delta V, \quad \int_S \vec{M}_S = (\vec{F} \times \vec{\Phi}_{noo}) \delta S, \quad (4)$$

де $\vec{F}_m = \delta \vec{Q} / \delta m$ – щільність масової сили, $\delta \vec{Q}$ – елемент сили, $\bar{\rho}_z$ – середня щільність ґрунту, \vec{F} – радіус-вектор точки прикладання сил відносно початку координат.

Враховуючи сукупність поверхневих і об'ємних сил і моментів (3)-(4), рух елемента ґрунту об'ємом V можна описати системою векторних рівнянь:

$$\begin{cases} \int_V \bar{\rho}_z \vec{F}_m \delta V + \int_V \vec{\Phi}_{noo} \delta S + (1 - f_{mp}^{6H} / f_{mp}^{3H}) \int_V \bar{\rho}_z \vec{F}_m \delta V = \int_V \bar{\rho}_z \vec{a} \delta V; \\ \int_V (\vec{F} \times \bar{\rho}_z \vec{F}_m) \bar{\rho}_z \delta V + (1 - f_{mp}^{6H} / f_{mp}^{3H}) \int_V (\vec{F} \times \bar{\rho}_z \vec{F}_m) \bar{\rho}_z \delta V + \int_S (\vec{F} \times \vec{\Phi}_{noo}) \delta S = \int_V (\vec{F} \times \vec{a}) \bar{\rho}_z \delta V, \end{cases} \quad (5)$$

де \vec{a} – прискорення елемента ґрунту, $\bar{\rho}_z \vec{a} \delta V$ – вектор сил інерції; $(1 - f_{mp}^{6H} / f_{mp}^{3H}) \int_V \bar{\rho}_z \vec{F}_m \delta V$ – комплексний вектор сил внутрішнього і зовнішнього тертя; f_{mp}^{3H} – коефіцієнт зовнішнього тертя; f_{mp}^{6H} – коефіцієнт внутрішнього тертя.

Зусилля, що прикладається з боку РОГМ до ґрунту, викликає його реакцію у вигляді опору, який визначається середнім напруженням:

$$\bar{\sigma} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^k \bar{F}_k}{\Delta S}. \quad (6)$$

Сукупність значень $\bar{\sigma}$ по всій поверхні РОГМ на глибині обробітку ґрунту дає можливість побудувати епюру напруження. Напруження виникають не тільки в точках контакту РОГМ з ґрунтом, але розповсюджуються углиб і вишир від області контакту.

Тому визначення поля напружень в даній локальній області ґрунту, в якій діє РОГМ, доцільно розглядати на основі стану рівноваги елементарного тетраедра [11,12], три грані якого є координатними площинками, а четверта – нахилена до осей координат (рис. 1).

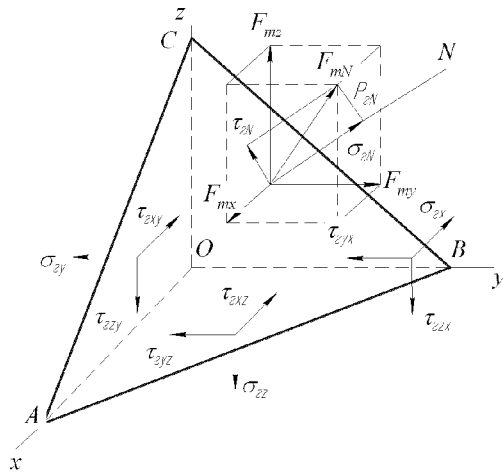


Рисунок 1 - Рівноважний стан елементарного тетраедра елемента ґрунту

При цьому напруження, що діють на кожну грань тетраедра, можна розкласти на нормальні складові $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ до площинок і дотичні (тангенціальних) $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$, які в свою чергу можна розкласти на паралельних осях: $\tau_{zyx}, \tau_{zxx}, \tau_{xxy}, \tau_{zzy}, \tau_{zyz}, \tau_{xzx}$. Зазначимо, що індекс при нормальному напруженні показує уздовж якої осі вибране напруження, а для дотичного напруження - перший індекс указує напрям, другий - на вісь, що перпендикулярна площинці грані.

Орієнтацію вектору нормалі \vec{N} до грані ABC (рис. 1) визначають величини напрямних косинусів: $\cos(N, x) = l$; $\cos(N, y) = m$; $\cos(N, z) = n$. Нескінченно зменшуючи грані тетраедра, грань ABC в граничному випадку проходить через точку O . Складові повного напруження p_N , в стані рівноваги елемента ґрунту, дорівнюють:

$$\begin{cases} p_{xx} = \sigma_{xx}l + \tau_{xy}m + \tau_{xz}n; \\ p_{yy} = \tau_{yx}l + \sigma_{yy}m + \tau_{yz}n; \\ p_{zz} = \tau_{zx}l + \tau_{zy}m + \sigma_{zz}n. \end{cases} \quad (7)$$

Відповідно напруження σ_N , становить:

$$\sigma_{2N} = p_{xx}l + p_{yy}m + p_{zz}n. \quad (8)$$

Дотичне напруження τ_{2N} визначається із співвідношення:

$$\tau_{2N} = \sqrt{p_{2N}^2 - \sigma_{2N}^2}. \quad (9)$$

Підставляючи проекції вектора \vec{p}_N (8) у (9), отримаємо:

$$\sigma_N = \sigma_x l^2 + \sigma_y m^2 + \sigma_z n^2 + 2\tau_{xy}lm + 2\tau_{xz}ln + 2\tau_{yz}mn. \quad (10)$$

Отже напружений стан елемента ґрунту в точці O повністю визначається тензором сукупності напружень:

$$T_{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

В елементах тензору перший індекс визначає площинку, на яку діє напруження, другий – напрям.

Зазначимо, що нормальне напруження вважається позитивним, якщо воно зумовлює розтяг елемента ґрунту, і негативним – його стиск. Дотичне напруження є позитивним і направлене у бік негативних напрямів відповідних осей координат, якщо зовнішня нормаль до площинки співпадає з негативним напрямом координатної осі.

Щоб отримати рівняння руху елемента ґрунту під час взаємодії з РОГМ, силове зусилля на ґрунт подамо через елементи тензору напружень (11), а рух – через вектор прискорення \vec{a}_2 , тобто $\{a_{2x}, a_{2y}, a_{2z}\}$:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \bar{\rho}_e F_{mx} (1 - f_{mp}^{en} / f_{mp}^{3n}) = \rho_e a_{2x}; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \bar{\rho}_e F_{my} = \rho_e a_{2y}; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \bar{\rho}_e F_{mz} = \rho_e a_{2z}. \end{cases} \quad (12)$$

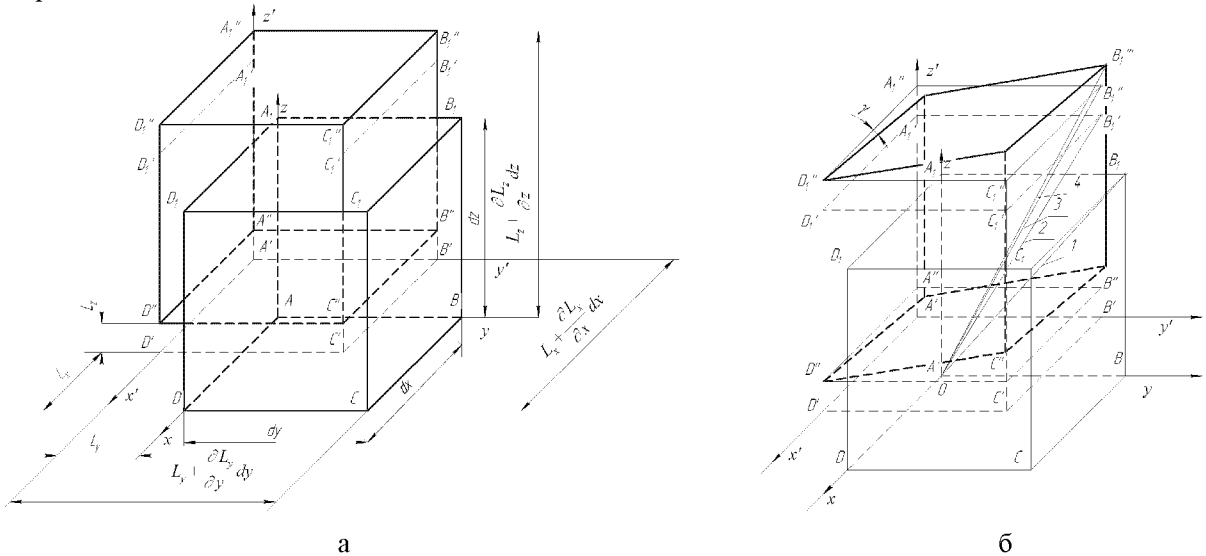
З урахуванням складових швидкості руху елемента ґрунту, система рівнянь (12) набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \bar{\rho}_z F_{mx} (1 - f_{mp}^{en} / f_{mp}^{zn}) = \bar{\rho}_z \left(\frac{\partial v_{xx}}{\partial t} + v_{xx} \frac{\partial v_{xx}}{\partial x} + v_z \frac{\partial v_{xx}}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_{xx}}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \bar{\rho}_z F_{my} = \bar{\rho}_z \left(\frac{\partial v_{yy}}{\partial t} + v_{xx} \frac{\partial v_{yy}}{\partial x} + v_{yy} \frac{\partial v_{yy}}{\partial y} + v_{zz} \frac{\partial v_{yy}}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \bar{\rho}_z F_{mz} = \bar{\rho}_z \left(\frac{\partial v_{zz}}{\partial t} + v_{xx} \frac{\partial v_{zz}}{\partial x} + v_{yy} \frac{\partial v_{zz}}{\partial y} + v_{zz} \frac{\partial v_{zz}}{\partial z} \right), \end{array} \right. \quad (13)$$

де $\bar{\rho}_z$ – середня щільність ґрунту, кг/м³; F_{mx} , F_{my} , F_{mz} – складові щільності об'ємних сил, Н/кг; v_{xx} , v_{yy} , v_{zz} – складові швидкості руху елементів ґрунту, м/с.

Система рівнянь (13) є сукупністю основних рівнянь динаміки напруженого стану ґрунту як суцільного середовища вздовж осей системи координат.

Характер деформації ґрунту під час його взаємодії з РОГМ більш наочно можна уявити на прикладі елемента ґрунту у вигляді паралелепіпеду $ABCD A_1 B_1 C_1 D_1$, ребра якого рівні dx , dy , dz (рис. 2, а), а початок системи координат знаходиться в точці A . В деформованому стані, без спотворення кутів між ребрами, елемент ґрунту має вигляд $A'B'C'D' A_1' B_1' C_1' D_1'$ - в напрямі плоского і $A''B''C''D'' A_1'' B_1'' C_1'' D_1''$ - в напрямі об'ємного переміщення.



- 1 – ($\vec{OB}_1 = \vec{dr}_0$) – недеформований стан; 2 – ($\vec{OB}'_1 = \vec{dr}_1$) – деформований в плоскому переміщенні;
 3 – ($\vec{OB}''_1 = \vec{dr}_2$) – деформований в об'ємному переміщенні; 4 – ($\vec{OB}'''_1 = \vec{dr}$) – деформований в об'ємному і кутівому переміщенні

Рисунок 2 - Загальний вигляд стану елемента ґрунту при деформації в напрямі плоского і об'ємного переміщення (а) і загальній лінійній та кутівій деформаціях

Лінійні переміщення точки A , а отже і деформації у напрямі осей координат позначимо відповідно через L_x , L_y , L_z . Тоді лінійне переміщення точки C у напрямі осей координат дорівнює: осі x – $L_x + \frac{\partial L_x}{\partial x} dx$, а у напрямі осі y – $L_y + \frac{\partial L_y}{\partial y} dy$ і осі z – $L_z + \frac{\partial L_z}{\partial z} dz$.

Це свідчить про те, що у напрямку осей координат елемент ґрунту підлягав відносній лінійній деформації:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial L_x}{\partial x} \frac{dx}{dx} = \frac{\partial L_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{yy} = \frac{\partial L_y}{\partial y} \frac{dy}{dy} = \frac{\partial L_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{zz} = \frac{\partial L_z}{\partial z} \frac{dz}{dz} = \frac{\partial L_z}{\partial z}. \quad (14)$$

Схема загальної деформації елемента ґрунту наведено на рис. 2, б. При кутівій деформації точка D'' переміститься в точку D''' , і величина деформації $A'D'''$ стане рівною

$\frac{\partial L_y}{\partial x} dx$, точка B'' переміщається в точку B''' , а величина відрізка $B'B'''$ складе $\frac{\partial L_x}{\partial y} dy$. При переміщенні елемента ґрунту величина деформації прямого кута дорівнює:

$$\gamma = \pi/2 - \angle B'''A''D''' = \angle B''A''B''' + \angle D''A''D'''.$$

Враховуючи малу величину цих кутів, можна прийняти $\angle B''A''B''' = \frac{B''B'''}{A''B''} = \frac{\partial L_x}{\partial y}$;

$\angle D''A''D''' = \frac{D''D'''}{A''D''} = \frac{\partial L_y}{\partial x}$. Тоді кутову деформацію в площині $xA''y$ становить:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial L_y}{\partial x} + \frac{\partial L_x}{\partial y}. \quad (15)$$

Аналогічно, розглядаючи відповідні грані паралелепіпеда елемента ґрунту при їх кутових деформаціях в площинах $xA''z$ та $yA''z$, маємо:

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial L_z}{\partial x} + \frac{\partial L_x}{\partial z}; \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial L_z}{\partial y} + \frac{\partial L_y}{\partial z}. \quad (16)$$

Об'єднуючі компоненти відносних лінійних і кутових деформацій, маємо систему рівнянь Коші:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \frac{\partial L_x}{\partial x}; \\ \varepsilon_{yy} = \frac{\partial L_y}{\partial y}; \\ \varepsilon_{zz} = \frac{\partial L_z}{\partial z}. \end{cases} \quad \begin{cases} \gamma_{xy} = \frac{\partial L_y}{\partial x} + \frac{\partial L_x}{\partial y}; \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial L_z}{\partial y} + \frac{\partial L_y}{\partial z}; \\ \gamma_{zx} = \frac{\partial L_z}{\partial x} + \frac{\partial L_x}{\partial z}. \end{cases} \quad (17)$$

Для дослідження загальної деформації елементарного елемента ґрунту розмістимо точку A в початок системи координат, тобто точку O . Сформуємо при цьому елементи радіус-векторів, з'єднавши точку O і точки B_1, B'_1, B''_1, B'''_1 : $\vec{OB}_1 = d\vec{r}_0^p$ – недеформований стан; $\vec{OB}'_1 = d\vec{r}_1^p$ – деформації в плоскому переміщенні; $\vec{OB}''_1 = d\vec{r}_2^p$ – деформований в об'ємному переміщенні; $\vec{OB}'''_1 = d\vec{r}$ – деформації в об'ємному і кутовому переміщенні (рис. 2, б). Напрямні косинуси l, m, n , для вихідного стану елемента ґрунту дорівнюють: $l = dx/dr$; $m = dy/dr$; $n = dz/dr$. В результаті деформації вектор \vec{OB} змінює свою довжину і напрям. Точка B переміститься в точку B''' .

При цьому довжина вектора стане dr , а напрямні косинуси дорівнюють:

$$l = \frac{dx + dL_x}{dr}; \quad m = \frac{dy + dL_y}{dr}; \quad n = \frac{dz + dL_z}{dr}. \quad (18)$$

Зазначимо, що для напрямних косинусів $(l_0 m_0 n_0)$ і (l, m, n) положень векторів $d\vec{r}_0^p$ і $d\vec{r}$ справедливі співвідношення:

$$l_0^2 + m_0^2 + n_0^2 = 1; \quad l^2 + m^2 + n^2 = 1. \quad (19)$$

Проекції повного переміщення точки B на осі x, y, z позначимо через dL_x, dL_y, dL_z , як повні диференціали:

$$\begin{cases} dL_x = \frac{L_x}{x} dx + \frac{L_x}{y} dy + \frac{L_x}{z} dz; \\ dL_y = \frac{L_y}{x} dx + \frac{L_y}{y} dy + \frac{L_y}{z} dz; \\ dL_z = \frac{L_z}{x} dx + \frac{L_z}{y} dy + \frac{L_z}{z} dz. \end{cases} \quad (20)$$

Враховуючи (19) в (20), маємо:

$$\left(\frac{dx + dL_x}{dr}\right)^2 + \left(\frac{dy + dL_y}{dr}\right)^2 + \left(\frac{dz + dL_z}{dr}\right)^2 = 1. \quad (21)$$

Враховуючи довжину вектора початкового стану, отримаємо:

$$\left(\frac{dx + dL_x}{dr_0}\right)^2 + \left(\frac{dy + dL_y}{dr_0}\right)^2 + \left(\frac{dz + dL_z}{dr_0}\right)^2 = \left(\frac{dr}{dr_0}\right)^2. \quad (22)$$

Приймаючи до уваги в рівнянні (22) систему рівнянь Коші (17) для лінійних і кутових деформацій елемента ґрунту, а також нехтуючи квадратами перших похідних переміщень, після деяких перетворень, отримаємо:

$$\left(\frac{dr}{dr_0}\right)^2 = 1 + 2[\varepsilon_{xx}l^2 + \varepsilon_{yy}m^2 + \varepsilon_{zz}n^2 + \gamma_{xy}lm + \gamma_{xz}ln + \gamma_{yz}mn]. \quad (23)$$

Відносна загальна деформація елемента ґрунту через елементарний радіус вектор визначається виразом:

$$\varepsilon_e = (dr - dr_0) / dr_0 = dr / dr_0 - 1.$$

Звідки $(dr / dr_0)^2 = 1 + 2\varepsilon_e + \varepsilon_e^2$, оскільки $\varepsilon_e^2 \ll \varepsilon_e$, то маємо:

$$(dr / dr_0)^2 \approx 1 + 2\varepsilon_e. \quad (24)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (24) і (23), отримаємо:

$$\varepsilon_e = \varepsilon_{xx}l^2 + \varepsilon_{yy}m^2 + \varepsilon_{zz}n^2 + \gamma_{xy}lm + \gamma_{xz}ln + \gamma_{yz}mn \quad (25)$$

Отже в тензорній формі деформація елемента ґрунту має вигляд:

$$T_{\varepsilon\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & (1/2)\gamma_{xy} & (1/2)\gamma_{xz} \\ (1/2)\gamma_{yx} & \varepsilon_{yy} & (1/2)\gamma_{yz} \\ (1/2)\gamma_{zx} & (1/2)\gamma_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Властивості матриці тензора деформації (26) багато в чому схожі з властивостями тензора напружень (11): $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$, а діагональні елементи є нормальними деформаціями елемента ґрунту: $\varepsilon_{xx} > \varepsilon_{yy} > \varepsilon_{zz}$.

Зазначимо, що по аналогії з теорією напруженого стану, умова $|\varepsilon_{ij} - \varepsilon\delta_{ji}| = 0$ [10], свідчить, що головні деформації елемента ґрунту є дійсними коренями кубічного рівняння:

$$\varepsilon_e^3 - J_1(\varepsilon_e)\varepsilon_e^2 + J_2(\varepsilon_e)\varepsilon_e - J_3 = 0, \quad (27)$$

$$\text{де } J_1(\varepsilon_e) = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}; \quad J_2(\varepsilon_e) = \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{zz}\varepsilon_{xx}; \quad J_3(\varepsilon_e) = \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz}. \quad (28)$$

Величини $J_1(\varepsilon_e)$, $J_2(\varepsilon_e)$, $J_3(\varepsilon_e)$ є інваріантами тензора деформацій відносно повороту осей координат.

Характер НДС елемента ґрунту, його руйнування і переміщення в процесі взаємодії з РОГМ залежить від умов дії навантаження з боку РОГМ, а також їх конструктивних і технологічних параметрів.

При побудові моделі взаємодії РОГМ з ґрунтом враховують НДС, процес руйнування середовища ґрунту та зміну характеристик і властивостей в області взаємодії,

а також необхідність реологічного підходу до обґрунтування змін, що відбуваються в ґрунті як суцільному багатофазному середовищі.

Висновки. З точки зору трибофізичного підходу теоретично обґрунтовано напружений стан середовища ґрунту в умовах дії на нього РОГМ. Отримано основне рівняння динаміки елемента ґрунту, враховуючи сукупність поверхневих та об'ємних сил і їх моментів та напружений стан ґрунту під час дії на нього РОГМ, з урахуванням середньої щільності ґрунту, складових швидкості ґрунту та коефіцієнту тертя. На основі аналізу деформацій в напрямі плоских, об'ємних та кутових переміщень ґрунтових елементів, з урахуванням системи відповідних рівнянь Коші, отримано вираз для визначення відносної деформації в елементі ґрунту під час дії на нього РОГМ та рівняння деформованого стану середовища ґрунту.

Зазначене теоретичне обґрунтування НДС можна використовувати при оптимізації форми РОГМ, розрахунку його тягового опору, розробці конструкцій і методів керування НДС та триботехнічними характеристиками робочих поверхонь РОГМ, а також розробці раціональних технологій обробітку ґрунту.

Список літератури

1. Аулін В.В. Динаміка зміни напружено-деформованого та зносного стану РЕ РОГМ при різних варіантах зміцнення /В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий //Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький. ХНУ, 2010.-№3.- С.54-59.
2. Аулін В.В. Зношувальна здатність ґрунтового середовища та закономірності спрацювання деталей РОГМ/ В.В. Аулін, А.А. Тихий //Проблеми трибології (Problems of tribology). Хмельницький. ХНУ, 2010. – №2 – С.6-10.
3. Аулін В.В. Напружено-деформований стан ґрунту при його взаємодії з різальними елементами робочих органів ґрунтообробних машин/ В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий// Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки.- Луганськ: ЛНАУ, 2009.- №3.- С. 6-17.
4. Аулін В.В. Підвищення довговічності РОГМ, зміцненням їх за різними варіантами та реалізацією ефекту самозагострювання/ В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий //Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. / вип.100.- Харків: ХНТУСГ, 2010.- С 158-165.
5. Аулін В.В. Самоорганізація геометричної форми різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин/В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий// Зб. тез матеріалів міжнар. наук. практ. конф. «Ольвійський форум 2010» Секція «Трибологія та ресурсозбереження» , 11-15 червня 2010.- Ялта:ЧДУ, 2010. – С.7.
6. Черновол М.І. Закономірності взаємодії різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин з ґрунтом/ М.І. Черновол, В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий/ Вісник інженерної академії України. Київ– 2008. – №3-4. – С. 196-203.
7. Черновол М.І. Обґрунтування методів зниження сил тертя ковзання РОГМ в ґрунтовому середовищі/ М.І. Черновол, В.В. Аулін, А.А. Тихий// Вісник інженерної академії України. Київ – 2009. – №3-4. – С. 231-236.
8. Черновол М.И. Повышение надежности режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин/ М.И. Черновол, В.В. Аулин, В.Н. Бобрицкий, А.А. Тихий// Сборник трудов международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Д.Г. Вадивасова 2-5 февраля 2009г.-С.179-185.
9. Баган М.С. Модель почвенного пласта/ М.С. Баган // Вестник ЧГАУ. - т.34. - Челябинск, 2001. - С.64-67.
10. Воронин А.Д. Основы физики почв/ А.Д. Воронин. - М: МГУ, 1986. - 214с.
11. Бледных В.В. Совершенствование рабочих органов почвообрабатывающих машин на основе математического моделирования технологических процессов: автореф. дис. докт. техн. наук.: 05.20.01 "Механизация сельскохозяйственного производства"/ В.В. Бледных. - Л.-Пушкин, 1989. - 37 с.
12. Горячкин В.П. Собрание сочинений/ В.П. Горячкин. Т.1-Т.3, М.: Колос, 1968. -720 с; 480 с; 360с.

В.Аулин

Трибофизическое обоснования изменений напряженно-деформированного состояния почвы во время действия РОПМ

В статье дано теоретическое обоснование трибофизического подхода к закономерностям взаимодействия в системе "РОПМ-почва". При этом получено уравнение состояния почвы в векторной форме, а также через поле напряжений и деформаций.

V.Aulin

Tribophysical grounds of changes of the tensely-deformed state of soil during the action of OPTM

In the article the characteristic changes of properties and tensely-deformed state of soil are considered during the action of operative parts of tillage machines. Their influence is educed on conformities to law of friction and wear in soil. The basic methods of decline of friction, wear and power-hungryness of till of soil are set forth.

Отримано 26.10.12