

Д.Г. Войтюк, проф., канд. техн. наук, В.П. Ковбаса, доц., канд. техн. наук
Національний аграрний університет;
О.В. Гуцаленко, канд. техн. наук
Вінницький державний аграрний університет

Нова концепція оптимізації параметрів грунтообробних робочих органів

Викладені основні положення нової концепції оптимізації параметрів та режимів роботи грунтообробних робочих органів на основі вирішення просторових задач контактної взаємодії робочий орган-грунт. Застосування концепції дозволяє знизити енергомісткість робочих органів не менше як на 15% при покращенні якості обробітку ґрунту.

параметри робочих органів, суцільне пружно-в'язкопластичне середовище, напружено-деформований стан, тензор напружень, девіаторна складова тензора, фізичні рівняння зв'язку, просторова контактна задача, критерій вигляду напружено-деформованого стану, потенціальні гармонічні функції, функція оптимізації

Зниження собівартості та підвищення продуктивності рослинництва може бути досягнуте шляхом зниження енергомісткості та підвищення якості одного з найбільш енергомістких процесів – обробітку ґрунту. Знизити енергомісткість обробітку ґрунту при забезпеченні агротехнічних вимог до нього можливо лише на основі глибокого аналізу процесів, які відбуваються у ґрунті при його механічному обробітку.

В класичній землеробській механіці використовуються методи аналізу взаємодії робочих органів з ґрунтом, які не дозволяють встановити функціональні зв'язки параметрів та режимів роботи робочих органів зі змінами технологічних властивостей оброблюваного середовища. Це пов'язане із формалізацією ґрунту як об'єкту, на який спрямована дія робочих органів у вигляді середовищ та тіл, механіка яких не може відображати зміни властивостей з умов їх існування, та законів і постулатів, які покладені в основи їх механічної поведінки.

Ґрунтова класифікація моделей формалізації ґрунту як об'єкту, на який спрямована дія грунтообробних робочих органів, виконана академіком Кушнар'євим А.С. Згідно цієї класифікації, найбільш поширеними методами формалізації ґрунту є формалізація абсолютно твердим тілом, сипким дискретним середовищем, ідеально пружним суцільним середовищем, а також методи теорії подібності та розмірностей [1]. Недоліки та наслідки такої формалізації висвітлені академіком Кушнар'євим А.С. Крім того, рішення задач механізації обробітку ґрунту, в основу яких покладені ці методи формалізації, зводяться здебільшого до визначення реакції ґрунту на робочий орган і не можуть пояснити змін технологічних властивостей оброблюваного середовища. Найбільш адекватною слід вважати формалізацію ґрунту як суцільного пружно-в'язкопластичного середовища, в межах механіки якого можуть бути отримані функціональні зв'язки параметрів та режимів роботи грунтообробних робочих органів зі змінами технологічних властивостей [1]. Такі методи формалізації набули широкого застосування наприкінці минулого століття [3,4,5].

Використання моделі суцільного пружно-в'язкопластичного середовища при аналізі взаємодії робочих органів з ґрунтом дозволяє встановити функціональні зв'язки параметрів робочих органів зі зміною технологічних властивостей ґрунту. Однак, відомі рішення можуть бути застосовані лише для описання робочих органів

осесиметричної форми, оскільки ці рішення мають плоский характер [1,2] і навіть поєднання двох плоских рішень суперечить основному принципу механіки суцільного середовища, а саме, сумісності дії деформацій.

Для процесів взаємодії робочих органів з ґрунтом дуже суттєвим є просторова постановка задач, оскільки зміни технологічних властивостей відбуваються у тримірному напівпросторі ґрунтового середовища навіть під дією робочих органів, геометрична форма яких може вважатися плоскою. Зміни технологічних властивостей ґрунту, які відбуваються внаслідок механічної дії на нього робочих органів, пов'язані зі зміною елементарних об'ємів та їх девіацією. Ці зміни викликають збільшення або зменшення об'ємної маси (густини) ґрунту та функціонально пов'язаного з нею питомим об'ємом його сухої фази – BWV . Остання має тісний кореляційний зв'язок із співвідношеннями максимального та мінімального головних напружень σ_1, σ_3 (рис.1.а), а отже і інваріантами повного тензора напружень σ_m, τ_{max} (рис.1.а) [2].

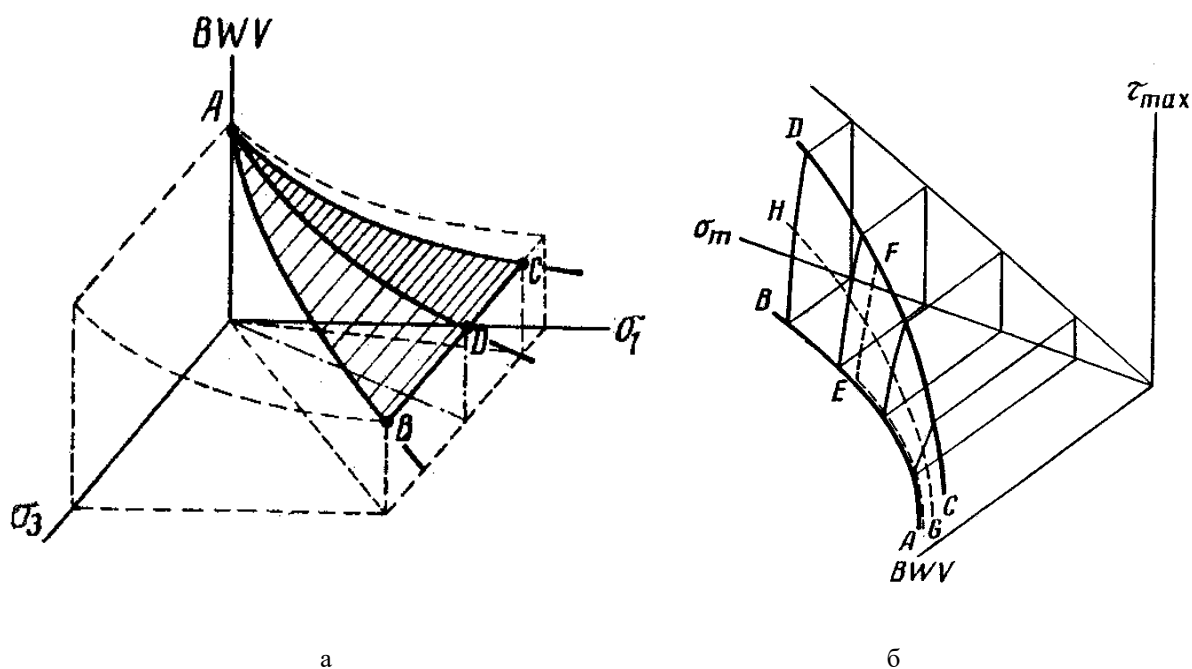


Рисунок 1 – Зв'язок між BWV головними напруженнями (а) та інваріантами напружень у ґрунті (б)

Співвідношення між інваріантами напружень в елементарному об'ємі ґрунту характеризуються параметром вигляду напружено-деформованого стану [6,7], і є величиною:

$$\mu = -\frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2}}, \quad (1)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ -- компоненти повного тензора напружень.

Інтегральна по деформованому об'єму ґрунтового середовища функція являється критерієм оптимізації параметрів та режимів роботи робочих органів, оскільки вигляд функції (1) повністю визначає можливі зміни властивостей ґрунту, причому при $\mu \rightarrow -\infty$ -- розтягнення, $\mu \rightarrow \infty$ -- стискання, $\mu = 0$ -- чистий зсув. Отже, для забезпечення зростання BWV (розпушення) величина параметру вигляду напружено-деформованого стану повинна $\mu \rightarrow -\infty$, для ущільнення ґрунту -- $\mu \rightarrow +\infty$.

Зміни величини компонент напружень залежать від умов навантаження ґрунтового середовища робочим органом ґрунтообробної машини, тобто від умов на поверхні контакту робочий орган-ґрунт. Оскільки з умов взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин з ґрунтом відома лише швидкість переміщення машини, то в якості початкових умов можуть виступати компоненти швидкостей переміщень точок ґрунту на поверхні контакту. В загальному випадку поверхня робочого органу може бути представлена неявним рівнянням в системі координат $\xi\eta\zeta$, яка співпадає за початком координат та напрямками осей з системою координат ґрунтового напівпростору xuz :

$$f = \xi - sl + b(\eta - bs)^\beta + c(\zeta - H)^\gamma. \quad (2)$$

Використання напрямних косинусів поверхні (2) дозволяє визначити компоненти швидкостей переміщень точок ґрунтового напівпростору на поверхні контакту у проєкціях на відповідні осі координат ґрунтового напівпростору [8]. Подальше застосування рішення Тедоне з використанням чотирьох гармонічних потенціальних функцій (три з яких є потенціалами подвійного шару, а четверта об'ємною деформацією) дозволяє визначити компоненти швидкостей переміщень точок ґрунтового середовища на відстані від поверхні робочого органу в залежності від параметрів функції поверхні (2). Подальше використання геометричних рівнянь Коші для пружного середовища дозволяє шляхом диференціювання компонент швидкостей переміщень по напрямках визначити компоненти повного тензора деформацій ґрунту в залежності від параметрів робочого органу. Можливість застосування рішення в пружній постановці ґрунтується на тому, що величини деформацій ґрунту до порушення суцільності мають другий порядок малости, що дозволяє нехтувати адитивними складовими другого порядку у геометричних рівняннях руху пластичного середовища.

Для отримання компонент напружень, що входять до функції критерію оптимізації (2), необхідно застосувати фізичні рівняння зв'язку напружень з деформаціями, в які входять постійні механічних властивостей ґрунту. Причому, ці фізичні рівняння описують зв'язок напружень з деформаціями в двох фазах деформування ґрунту – фазі зворотних в'язко-пружних деформацій та фазі в'язкопластичної течії. Такими фізичними рівняннями за результатами наших досліджень є функція:

$$\sigma_{ij} KV = \frac{\sigma_s \text{Sign}[\dot{\epsilon}_{ij}] \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg[k \dot{\epsilon}_{ij}] \right) + \mu \dot{\epsilon}_{ij}}{\frac{2Gt^{(v+1)}}{E^{\mu(v-1)} + 1}}; \quad \tau_{ij} KV = \frac{\tau_s \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg[k \dot{\gamma}_{ij}] \right) + \mu \dot{\gamma}_{ij}}{\frac{Gt}{E^\eta + 1}}, \quad (3)$$

де σ_{ij} -- компоненти напружень;

$\dot{\epsilon}_{ij}, \dot{\gamma}_{ij}$ -- компоненти швидкостей деформацій;

σ_s, τ_s -- граничні значення пластичності середовища;

ν -- коефіцієнт Пуассона;

G -- модуль пружності при зсувних деформаціях;

μ -- коефіцієнт в'язкості.

Механічна модель такого середовища являє собою послідовно з'єднані через стопор $\langle \epsilon \rangle$ тіла Кельвіна-Фойгта та Бінгама (рис.2).

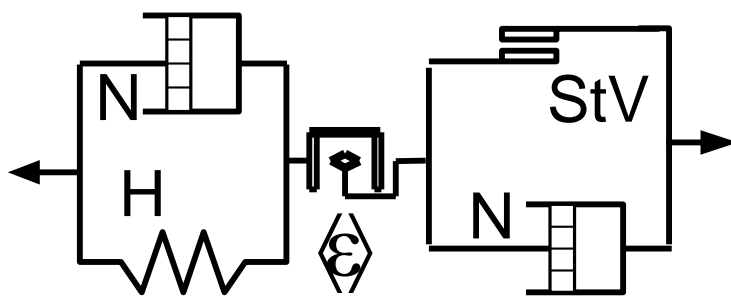


Рисунок 2 – Механічна модель ґрунту KV для двох фаз деформування

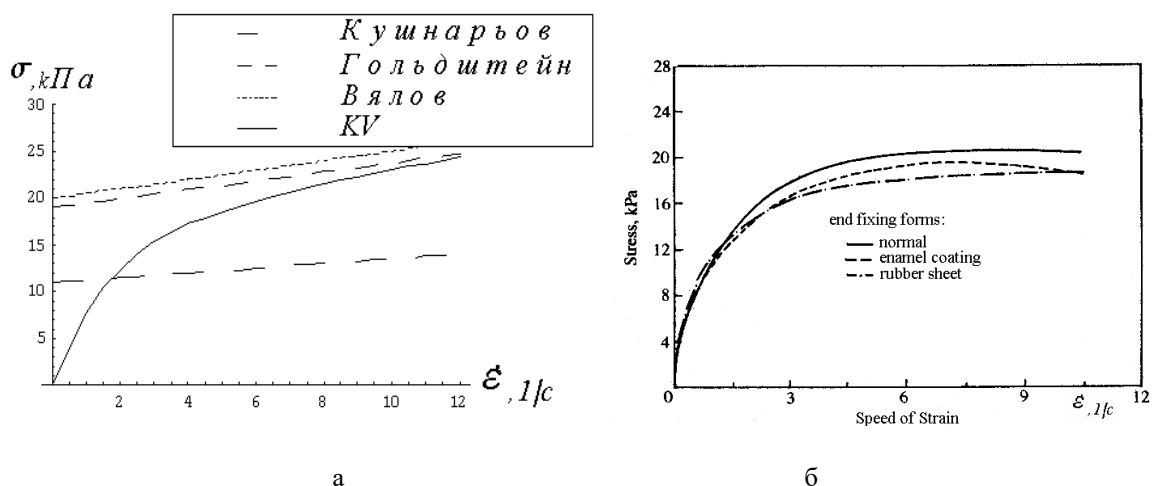


Рисунок 3 – Зв'язок напружень з деформаціями для найбільш поширених моделей (а) та за результатами експериментів Waclaw Kolodziej, Jan Pirog [10]

Відомі значення компонент швидкостей деформацій [6,7,8] разом з фізичними рівняннями (3) дозволяють отримати функціональні зв'язки параметрів ґрунтообробного робочого органу з напруженнями у ґрунті з певними механічними властивостями: модулем пружності зсувних деформацій G , граничним значенням пластичності σ_s , коефіцієнтом Пуассона ν та коефіцієнтом в'язкості μ [9]. Отримані значення компонент напружень дозволяють одержати функцію оптимізації параметрів робочих органів в аналітичному вигляді.

Функція оптимізації має дуже громіздкий вигляд, тому привести її в повному обсязі в межах статті неможливо. В загальному вигляді вона має вигляд: $I\mu = \Phi(h1, h2, b1, b2, b, \beta, c, \gamma, G, \sigma_s, \mu, \nu, Um...)$, де $h1, h2, b1, b2$ -- геометричні розміри робочого органу – висота та ширина, відповідно.

Отримана таким чином функція оптимізації дозволяє визначити оптимальні значення параметрів робочих органів ґрунтообробних машин.

При визначенні меж інтегрування функції $I\mu = \iiint_V \mu \, dx \, dy \, dz$ слід враховувати глибину ходу робочого органу та його ширину. Підінтегральною функцією μ у виразі для оптимізації є щільність розподілу вигляду напружено-деформованого стану ґрунту у напівпросторі.

Так, для пасивного робочого органу, поверхня якого задана функцією $f = \xi - sl + b(\eta - bs)^\beta + c(\zeta - H)^\gamma$, межі інтегрування визначаються наступним чином:

- в напрямку осі ox нижня границя інтегрування знаходиться на поверхні деформатора і відповідає $x = sl - b(\eta - bs)^\beta - c(\zeta - H)^\gamma$, верхня границя обмежена можливою областю деформування ґрунту у напрямку руху деформатора;

- в напрямку осі oz нижня межа інтегрування 0 ; що відповідає поверхні поля; а верхня повинна перевищувати висоту шару ґрунту перед робочим органом на деяку величину, тобто повинна становити $z \equiv h2 + h0$;

- в напрямку осі oy нижня межа інтегрування $y \equiv b1$, верхня межа інтегрування повинна перевищувати ширину (напівширину для симетричного) робочого органа $y \equiv b2 + b0$.

Параметрами оптимізації для пасивних робочих органів згідно отриманої вище функції для конкретних розмірів робочого органа: -висоти $h2 - h1$, ширини $b2 - b1$ при відомих значеннях властивостей ґрунту: -модуля пружності G , коефіцієнтів в'язкості μ , граничного напруження пластичності σ_s , ϵ коефіцієнти та показники ступеня рівняння поверхні робочого органу $f = \xi - sl + b(\eta - bs)^\beta + c(\zeta - H)^\gamma$. При цьому для спрощення оптимізації форми одного робочого органу можна прийняти $sl = 0, bs = 0, H = 0$.

В зв'язку з громіздкістю виразу функції оптимізації доцільно скористатися методом прямого пошуку оптимуму. Наприклад, модифікованим методом Хука-Дживса. В загальному випадку оптимізація параметрів пасивних робочих органів ґрунтообробних машин за модифікованим методом Хука-Дживса [11] передбачає знаходження початкових значень параметрів оптимізації (змінних), після чого проводиться пошук оптимуму в різних напрямках від початкових значень.

Процедура оптимізації може бути представлена схемою, яка наведена нижче.

Ефективність процедури пошуку оптимальних значень параметрів оптимізації робочих органів ґрунтообробних машин в деякій мірі залежить від суб'єктивних факторів -- тобто інтуїції дослідника та правильності вибору значень $Um = Um_0, \beta = \beta_0, \gamma = \gamma_0, c = c_0, b = b_0$, або $Um = Um_0, R = R_0, r = r_0, \alpha = \alpha_0, \gamma = \gamma_0$. В кожному разі на підставі отриманих значень параметрів оптимізації необхідно обчислити енергомісткість роботи ґрунтообробного робочого органу. Ця енергомісткість для пасивного робочого органу може бути визначена з умов на поверхні контакту робочий орган-ґрунт як:

$$A = PUm, P = l\sqrt{Rx^2 + Ry^2 + Rz^2}, R_x = \int_{h1}^{h2} \int_{b1}^{b2} (\sigma_x l + \tau_{xy} m + \tau_{xz} n) d\eta d\xi;$$

$$R_y = \int_{h1}^{h2} \int_{\xi(h1)}^{\xi(h2)} (\sigma_y m + \tau_{yz} n + \tau_{xy} l) d\xi d\xi, R_z = \int_{b1}^{b2} \int_{\xi(h1)}^{\xi(h2)} (\sigma_z n + \tau_{xz} l + \tau_{yz} m) d\xi d\eta, \quad (4)$$

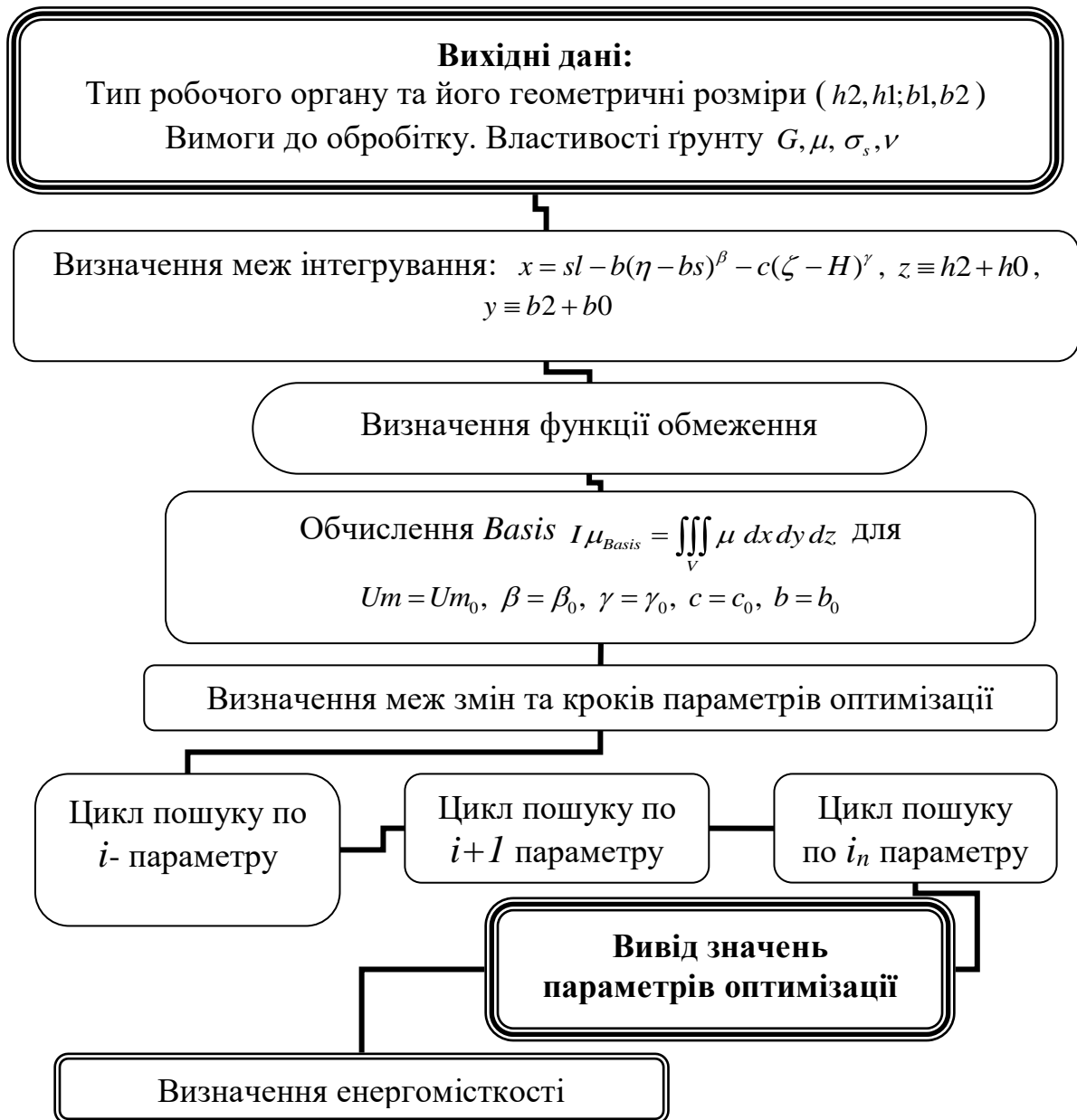
де l, m, n напрямні косинуси нормалі до поверхні робочого органа.

Для встановлення адекватності та ефективності методики оптимізації параметрів робочих органів була проведена експериментальна перевірка методики, яка передбачала:

- визначення оптимальних параметрів розпушуючих робочих органів ґрунтообробних машин для конкретних ґрунтово-кліматичних умов;

- виготовлення партії розпушуючих робочих органів з оптимальними параметрами;

- порівняльні випробування ґрунтообробних машин з серійними та оптимізованими робочими органами у польових умовах з визначенням енергомісткості та якості виконання процесу.



Оптимізація параметрів робочих органів проводилась для розпушувальних лап ґрунтообробного комбінованого агрегату АГ-6. Виготовлення оптимізованих робочих органів здійснювалось на ВАТ „БОРЕКС”.

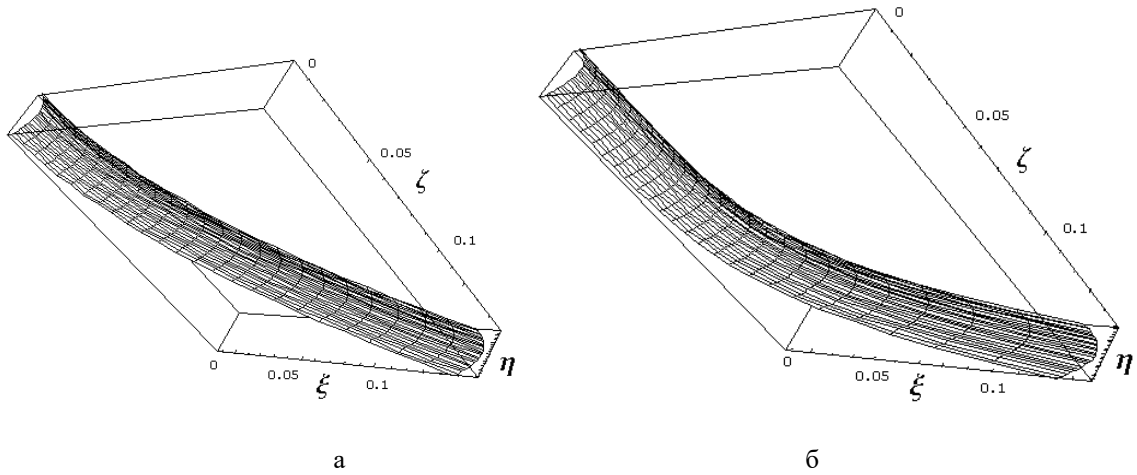
Порівняльна оцінка енергомосткості та якості виконання процесу обробітку ґрунту здійснювалась на експериментальній базі та із застосуванням апаратури ВАТ „БОРЕКС” у відповідності до державних та галузевих стандартів.

За результатами проведеної оптимізації параметрів розпушуючих робочих органів комбінованої ґрунтообробної машини АГ-6 були виготовлені робочі органи з оптимальними для конкретних ґрунтових умов параметрами.

Для порівняльної оцінки енергомосткості та якості обробітку ґрунту машинами з серійними робочими органами та оптимізованими до конкретних ґрунтових умов ґрунтообробна машина АГ-6 була обладнана виготовленими на ВАТ „БОРЕКС” робочими органами з параметрами, які отримані в результаті оптимізації за методикою, розробленою в даній роботі. Форма поверхні серійного $\xi = sl - 24(\eta)^2 + 5(\zeta)^2$

розпушуючого та оптимізованого $\xi = sl - 24(\eta)^2 + 1500(\zeta)^5$ робочих органів та їх загальний вигляд представлені на рис.4, 5.

В результаті проведених порівняльних випробувань оптимізованих розпушуючих робочих органів ґрунтообробної машини АГ-6 отримані результати, що наведені в таблиці (рівень надійної імовірності результатів становив $P = 0.90$).



а – серійного $\xi = sl - 24(\eta)^2 + 5(\zeta)^2$, б - оптимізованого $\xi = sl - 24(\eta)^2 + 1500(\zeta)^5$

Рисунок 4 – Поверхні розпушуючих робочих органів



а – серійного, б – оптимізованого

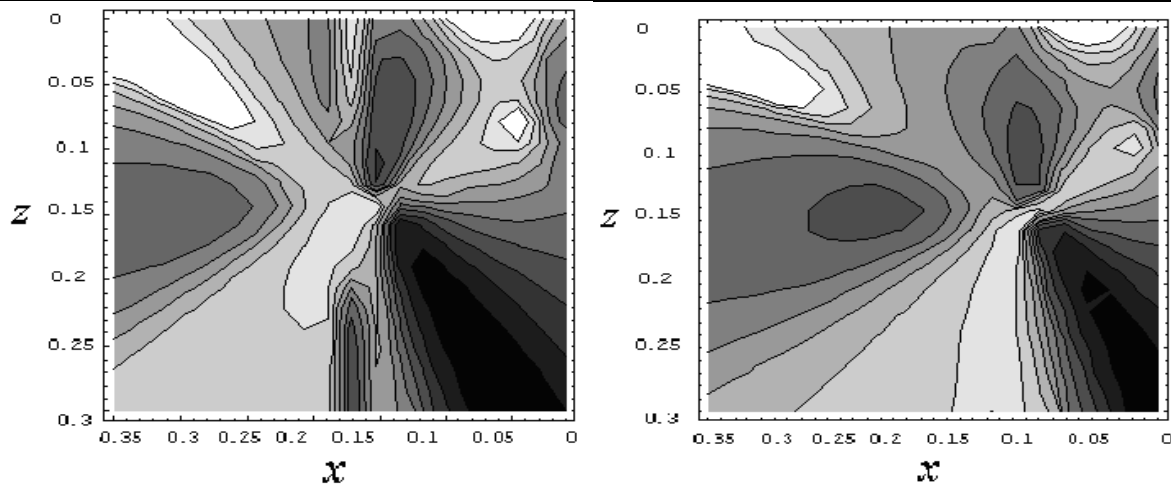
Рисунок 5 – Загальний вигляд розпушуючих робочих органів

Зниження тягового опору при використанні робочого органа з оптимальними для певних ґрунтових умов властивостями на 15% свідчить про ефективність застосування результатів проведених досліджень та ще раз підтверджує адекватність розробленої концепції оптимізації робочих органів. З механістичного погляду забезпечення зниження тягового опору та незначне підвищення BWV пояснюється змінами розподілу об'ємних деформацій та показника вигляду напруженого стану (рис.6) у ґрунтовому середовищі під дією серійного та оптимізованого розпушуючих робочих органів.

Крім того, зниження тягового опору буде ще більш суттєвим при застосуванні робочих органів із більшою глибиною ходу, про що свідчать графіки, наведені на рис. 7.

Таблиця – Результати порівняння енергомісткості та якості виконання обробітку ґрунту

Показник		Базовий робочий орган	Оптимізований робочий орган
1	Агрегат	Трактор ХТЗ-120+АГ-6	Трактор ХТЗ-120+АГ-6
2	Ширина захвату, м	6	6
3	Робоча швидкість, м/с	4.5	4.5
4	Глибина обробітку, м	0.15	0.15
5	Властивості ґрунту: тип ґрунту Модуль пружності об'ємних деформацій, МПа Коефіцієнт в'язкості об'ємних деформацій, кПа с Граничне напруження зсуву ґрунту, кПа	Середньо суглинковий 28-30 1,6-1,7 78-84	Середньо суглинковий 28-30 1,6-1,7 78-84
6	Питомий об'єм сухої фази ґрунту BWV (до обробітку), 10^{-4} м ³ /кг	6.5-7.2	6.5-7.2
7	Тяговий опір на один робочий орган, кН	0.385	0.320
8	Питомий об'єм сухої фази ґрунту BWV (після обробітку), 10^{-4} м ³ /кг	8.5-9.2	8.9-9.7



а – серійного, б – оптимізованого

□ -- зони розтягнення ■ -- зони стискання

Рисунок 6 – Характер розподілу величини параметру вигляду напружено-деформованого стану ґрунту під дією розпушуючих робочих органів

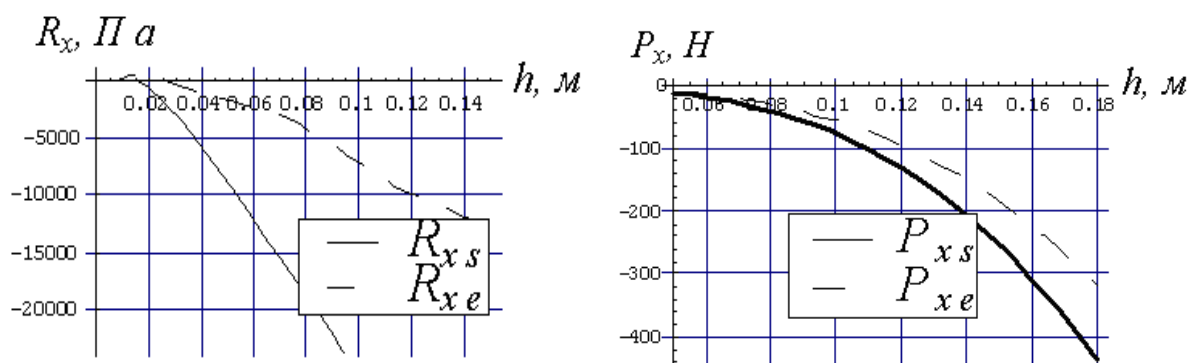


Рисунок 7 – Характер змін: горизонтальної складової тиску ґрунту на поверхню робочих органів (серійного R_{xs} , оптимізованого R_{xe}) та горизонтальної складової тягового опору робочих органів (серійного P_{xs} , оптимізованого P_{xe})

Список література

- 1 Кушнарев А.С., Кочев В.И. Механико-технологические основы обработки почвы.– К.: Урожай, 1989 – 144 с. Кулен А, Куиперс Х. Современная земледельческая механика. – М.: Агропромиздат, 1986. – 349 с.
- 2 Бабицкий Л.Ф. Біонічні напрямки розробки ґрунтообробних машин.– К.: Урожай, 1998. –164 с.
- 3 Панченко А.Н. Теория измельчения почв почвообрабатывающими орудиями. -- Днепропетровск. 1999, - 140 с.
- 4 Шевченко И.А., Рогач Ю.П. Математическая модель движения элементов почвы по криволинейной поверхности //Труды международной конф. «Моделирование процессов и технологического оборудования в с.х.». – Мелитополь: ТГАТА, 1994.- С. 31-34.
- 5 Ковбаса В.П. Про визначення критерію вигляду напружено-деформованого стану суцільного середовища //Вісник Харківського держ. техн. університету с.г. Вип.. 8, т. 2. Харків, 2001.– С.79-82.
- 6 Ковбаса В.П. Вплив геометричної форми деформатора на вигляд деформованого стану середовища //Наук. вісник НАУ. Вип. 49, Київ, 2002.– С.133-139.
- 7 Ковбаса В.П. Переміщення та деформації середовища перед робочим органом у просторі //Наук. вісник НАУ. Вип. 60, Київ, 2003.– С.198-203.
- 8 Ковбаса В.П., Дубровін В.О. Розподіл напружень та вигляд напруженого стану у ґрунтового напівпросторі перед пасивним робочим органом //Зб.наук.праць.- Дослідницьке: УкрЦВТ, 2003.- №6.- С.270-277.
- 9 Waclaw Kolodziej, Jan Pirog. Substantial characterization of soil While Ballasted //Soil mechanics in agriculture. Warszawa, 1976. – P. 43-66.
- 10 Банди. Б. Методы оптимизации. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

Изложены основные положения новой концепции оптимизации параметров и режимов работы почвообрабатывающих рабочих органов на основе решения пространственных задач контактного взаимодействия рабочий орган-почва. Применение концепции позволяет снизить энергоемкость рабочих органов не менее чем на 15% при повышении качества обработки почвы.

The original positions of the new concept of optimization of parameters and duties of end-effectors for soil's handling on the basis of the solution of spatial problems of contact interaction an end-effectors with soil is enunciated in this article. The use of the concept allows to lower power consumption of end-effectors not less than on 15 % with pinch of quality of soil's handling.

Одержано 20.07.05