

Андрій Шимко

Луцький національний технічний університет,
аспірант
Україна, Луцьк
shymkoandrej@gmail.com

Олена Налобіна

д.т.н., проф.,
Національний університет водного господарства та
природокористування
Україна, Рівне
o.o.nalobina@nuwm.edu.ua

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЛЕМІШНОЇ ЧАСТИНИ
ПІДКОПУЮЧОГО РОБОЧОГО ОРГАНУ НА НАПРЯМ ЗМІН
ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ**

Анотація. У статті викладено результати теоретичних досліджень удосконаленого підкопуючого робочого органу картоплезбиральної машини, який запропоновано виконати у вигляді гіперболічного параболоїду. У відповідності до поставленої задачі досліджень проаналізовано вплив параметрів лемішної та сепарувальної пруткової частини робочого органу та механічних властивостей ґрунту на напруження в ґрунті та їхню зміну. Аналіз напруженого стану ґрунту дозволив встановити коефіцієнти рівняння поверхні леміша та поверхні, в якій розміщені сепарувальні прутки які визначають геометричну форму поверхні лемеха, її кривину, поверхні в якій розташовано прутки сепаруючої частини.

Ключові слова: ґрунт, картопля, робочий орган, механічні властивості, напруження, середовище, параметри
Формул: 4, рис.: 6, табл.: 0, бібл.: 16

Andrii Shymko

Lutsk national
technical university
post-graduate student
Ukraine, Lutsk
shymkoandrej@gmail.com

Olena Nalobina

National university of water
and environmental engineering
Doctor of technical science, professor
Ukraine, Rivne
o.o.nalobina@nuwm.edu.ua

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE LEMPORARY PART OF
THE WORKING BODY ON THE GRAIN-TU PROPERTIES CHANGE**

Annotation. In the article, in accordance with the task of research, the influence of the parameters and operating modes of the blade and separation rod part of the working body for the excavation of potatoes and mechanical

properties of the soil on the change of its mechanical properties, its dissolution and the possibility of fracture of continuity, which will provide better conditions, is analyzed. Sowing soil agro-gates through the bar section of the separation surface. In the first approximation, the working body when entering the soil is represented as a hyperbolic paraboloid. The equation of the surface of the lemma and the surface in which the separating rods are placed is implicitly recorded. In order to establish the rational values of the coefficients of this equation, which determine the geometric shape of the lemeh's surface, its curvature, the curvature of the surface in which the separating rods are located, the connection of the di-tminical quantities, in particular the stresses in the soil, depending on their mechanical properties properties and geometric parameters and operating modes of the lemmas. These dynamic quantities are components of stress in the soil sediment. These components are determined by dependencies that reveal the relationship of stresses with strain rates. In order to obtain a visual picture of the influence of the parameters of the darned part of the digging working body on the direction of soil changes, contour graphs of the isolines of the magnitude of the form of its intense state were obtained in terms of the influence of the lemmas on various parameters. Charts are obtained using the application of *Mactematica* It provides the values of the coefficients that are included in the equation of the surface of the surface and the surface in which the separating rods are distributed are changed. The analysis of the graphic dependences obtained allowed to establish the rational values of the coefficients of the equation of the surface of the lemma and the surface in which the separation bars are determined, which determine the geometric shape of the surface of the le-fur, its curvature, the surface of which is the rods of the separating part.

Keywords: soil, potato, working organ, mechanical power, stress, environment, parameters

Formulas: 4, fig.:6, tabl.:0, bibl.: 16

Вступ. Картопля – культура різнобічного використання. Вона є одним з основних продуктів харчування, її широко використовують в якості корму для худоби та у промисловості. Цінність цієї культури визначається вмістом у бульбах крохмалю, білка, вітамінів, амінокислот та мінеральних солей.

Картопля важлива сільськогосподарська культура в світі. Дана культура займає лідерські позиції після пшениці, рису та кукурудзи. Більше ніж мільярд людей споживають дану культуру [Kibar 2012]. Найбільш потужними виробниками картоплі у світі є Китай (валовий збір – 96,0 млн. тон), Індія – 46,0 млн. тон; Росія – 34 млн.тон [<http://мниап.рф/repository/analytics/248/document.pdf>].

Виробництво картоплі набуло розвитку й у країнах, що розвиваються [Devaux, Kromann, Ortiz 2014; Ayalew, Paul, Hirpa 2014]. Це пояснюється тим, що картопля забезпечує для людей значний об'єм поживних речовин з одиниці площі.

Для України картопля є важливою та традиційною сільськогосподарською культурою. Під картоплю було відведено 11291,2 тис. га у 2015 році та 1323,3 тис. га у 2017 році [Рослинництво України. Статистичний збірник 2017].

Агро-кліматичні умови сприяють нарощуванню виробничих потужностей. Україна може вийти на світовий ринок як потужний експортер картоплі. Це вимагає збільшення об'ємів виробництва даної культури, підвищення якості продукції.

Аналіз досліджень та постановка завдання. Збирання є відповідальним технологічним процесом вирощування картоплі. Якість виконання даного процесу, його енергоємність залежать від багатьох факторів. Зокрема, вибору засобів механізації.

Дослідженнями технологій та конструкцій машин для збирання картоплі, розробкою нових робочих органів та вдосконаленням існуючих займались: R.W.Chase, N.R. Thompson, R.L. Ledebuhr, C.M. Hansen, R.B. Kitchen. (1978), Попов А.А. (1984), Петров Д.Г. (1989), Пшеченков К. А. (2012), D. Amare, G. Kidanemariam, W. Endalew, S. Yilma (2015), H.W. Piatt, A.J. Campbell, I. Birt, B.MacKinnon (1990), Misener, G.C., L.P. McMillan (1982), Misener, G.C., L.P. McMillan (1987) та багато інших.

Аналіз відомих досліджень виявив, що на даний час збирання картоплі здійснюється двома способами: однофазним і двофазним. Для реалізації даних способів використовують пасивні, активні та комбіновані робочі органи. Якість виконання збиральних робіт залежить від багатьох факторів, зокрема конструктивних, кінематичних параметрів машин, характеру їхньої взаємодії з об'єктом впливу, фізико-механічних властивостей бульб картоплі та ґрунтів.

Аналізу досліджень взаємодії робочих органів із ґрунтом присвячено роботи Кострицина О.К. (1986), Кушнар'ова А.С. (1980), Ковбаси В.П. (2001). Стан досліджень взаємодії робочих органів із ґрунтом виявив, що за останнє десятиріччя суттєвих змін у формалізації ґрунту не відбулося. Тому, за формою подання моделі побудови ґрунту можна розділити на п'ять груп: 1) тверде тіло; 2) суцільне пружне середовище; 3) суцільне сипуче середовище; 4) суцільне пружно-в'язко-пластичне середовище; 5) формалізація методами теорії подібності та розмірностей [Кострицин 1986, Кушнар'ов 1980, Ковбаса, Швайко, Гуцол 2015]. Виходячи з цього, частіш за все використовують моделі, що більше нагадують взаємодію з абсолютно твердим тілом, або моделі що використовуються в класичній теорії механіки ґрунтів, які базуються на механіці сипких дискретних середовищ. Крім того, при побудові моделей взаємодії частіш за все використовують або одномірні моделі, або, у кращому випадку, плоскі рішення, які не завжди відображають реальний процес змін властивостей ґрунту під дією робочого органу [Кушнар'ов 1980].

Необхідно відзначити, що густина ґрунту під дією робочого органу змінюється в функції шести компонент деформацій або напружень, що не можна відобразити у плоскій постановці задачі, а тим більше – в одномірній, які дуже часто використовують при розв'язанні аналогічних задач. Крім того, одномірна або плоска постановки задачі не дозволяють визначити всі три складові опору руху робочого органу в ґрунті.

Виходячи з цього, розв'язок задачі про взаємодію робочого органу з ґрунтом у тримірній постановці з встановленням взаємозв'язку геометричних параметрів і режимів роботи самого робочого органу зі зміною властивостей ґрунту, а також компонент тягового опору є актуальною задачею, яка потребує вирішення.

З урахуванням вище означеного, сформульовано мету роботи: обґрунтувати конструкцію робочого органу картоплезбиральної машини базуючись на встановленні та аналізі залежності зв'язку параметрів підкопуючого лемеха з механічними властивостями ґрунту та їхньою зміною.

Результати дослідження. З метою проведення досліджень формалізуємо форму та параметри робочого органу для викопування бульб картоплі.

Процес викопування бульбоплодів складається з декількох послідовних операцій, а саме: підкопування скиби ґрунту разом з коренеплодами, транспортування по підкопувальній поверхні скиби з бульбоплодами, переміщення цієї скиби по сепарувальній поверхні робочого органу і подальше переміщення картопляного вороху разом з залишками ґрунту на активну сепарувальну частину робочого органу.

У відповідності до поставленої задачі досліджень проаналізуємо вплив параметрів та режимів роботи лемішної та спарувальної пруткової частини робочого органу та механічних властивостей ґрунту разом з бульбами на зміну механічних властивостей ґрунту, його розуцільнення та можливість руйнування суцільності, що забезпечить кращі умови просівання агрегатів ґрунту через пруткову частину сепарувальної поверхні.

В першому наближенні робочий орган при входженні у ґрунт схематично представимо у вигляді конструкції, що наведена на рис. 1.

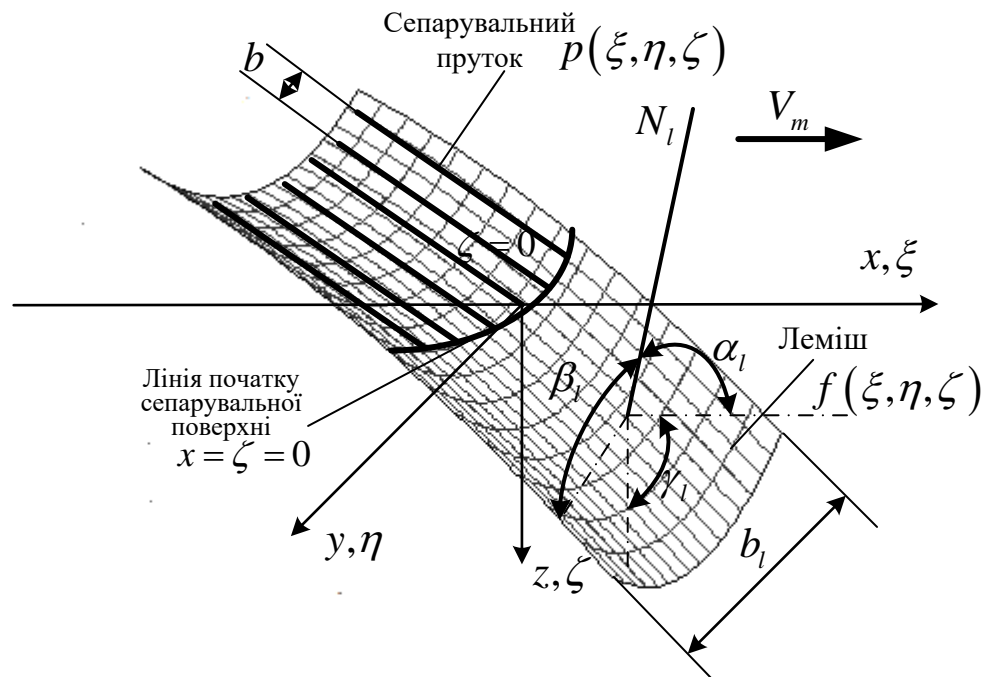


Рисунок 1 - Загальна схема підкопувально-сепарувального робочого органу
Джерело: розроблено авторами

На схемі прийняті наступні позначення: $f(\xi, \eta, \zeta)$ - рівняння поверхні леміша, $f_c(\xi, \eta, \zeta)$ - рівняння поверхні обмежувальної стінки, $p(\xi, \eta, \zeta)$ - рівняння поверхні сепарувального прутка, h - висота обмежувальної стінки, b - крок розстановки сепарувальних прутків у поперечному напрямку, тобто в напрямку осі y , n_l - нормаль до поверхні

леміша, n_l - нормаль до поверхні стінки, α_l - кут нахилу нормалі до поверхні леміша до осі $\xi idem x$, β_l - кут нахилу нормалі до поверхні леміша до осі $\eta idem y$, γ_l - кут нахилу нормалі до поверхні леміша до осі $\zeta idem z$, α_c - кут нахилу нормалі до поверхні стінки до осі $\xi idem x$, β_c - кут нахилу нормалі до поверхні стінки до осі $\eta idem y$, γ_c - кут нахилу нормалі до поверхні стінки до осі $\zeta idem z$, V_m - швидкість переміщення робочого органу в напрямку осі x .

Для формалізації поверхонь частин робочого органу необхідно записати рівняння поверхонь їхніх складових частин в системі координат $\xi\eta\zeta$.

Рівняння поверхні леміша та поверхні, в якій розміщені сепарувальні прутки, подамо у вигляді гіперболічного параболоїду у неявному вигляді:

$$f_l = \zeta - \left(d + c \left(\frac{((\phi\xi) + s)^2}{a} - \frac{(\kappa\eta)^2}{b} \right) \right), \quad (1)$$

де ϕ, s, a, κ, b - коефіцієнти, що характеризують форму розташування та параметри кривизни поверхні лемішної частини, яка в подальшому переходить в пруткову сепарувальну частину. При цьому перехід в сепарувальну частину поверхні відбувається при координатах $\zeta = z$, що відповідає поверхні поля.

Враховуючи осьову симетрію робочого органу відносно осі ξ, x будемо розглядати частину робочого органу. Крім того, весь робочий орган можна розглядати як окремі частини при взаємодії з ґрунтом та ворохом у послідовності взаємодій. Зміни напружено-деформованого стану можуть визначатися шляхом накладання цих станів від дії окремих елементів робочого органу. Тому доцільно розглядати поетапно спочатку взаємодію лемішної частини та обмежувальної стінки, як окремих елементів, з середовищем, а потім розташувавши в зручному положенні систему координат відокремленої скиби ґрунту з бульбами розглянути умови змін властивостей ґрунту та можливі умови сепарації на прутковій частині робочого органу.

При формалізації механічних властивостей робочого органу, що взаємодіє з матеріалом або середовищем, приймемо до уваги те, що механічні властивості робочого органу повинні мати значення, що характеризують його деформівні властивості вищі за аналогічні значення середовища або матеріалу. Для випадку коли нема суттєвих обмежень щодо пошкоджень або руйнування цілісності матеріалу внаслідок перевищення допустимих напружень, робочий орган може бути формалізований як абсолютно тверде недеформівне тіло.

При розв'язанні задачі про взаємодію робочого органу для відокремлення скиби ґрунту з бульбоплодами та подальшого руйнування її суцільності була прийнята модель ґрунту у вигляді в'язко-пружного середовища, яке може бути формалізоване моделлю Кельвіна-Фойгта. Згідно цієї моделі, внаслідок прикладення навантаження, відбувається в'язко-пружне деформування матеріалу, за якого зі збільшенням швидкості

прикладення навантаження швидкість деформації зростають пропорційно зниженню модуля в'язкості.

Для аналізу впливу параметрів та режимів роботи лемішної частини викопувального робочого органу, необхідно було визначити зв'язок динамічних величин, зокрема напружень у ґрунті в залежності від їх механічних властивостей та геометричних параметрів і режимів роботи леміша. Такими динамічними величинами є компоненти напружень у ґрунтовому середовищі. Ці компоненти визначаються за залежностями, які розкривають зв'язок напружень зі швидкостями деформацій та мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (6\epsilon_x - 3(\epsilon_y + \epsilon_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu) \epsilon}{-1+2\nu}); \\ \sigma_y &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (-3(\epsilon_x - 2\epsilon_y + \epsilon_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu) \epsilon}{-1+2\nu}); \\ \sigma_z &= \frac{4}{9} e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) (-3(\epsilon_x + \epsilon_y - 2\epsilon_z) - \frac{e^{\frac{Gt}{\eta(1+\nu)}} (1+\nu) \epsilon}{-1+2\nu}); \\ \tau_{xy} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \epsilon_{xy}, \quad \tau_{yz} = 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \epsilon_{yz}, \\ \tau_{xz} &= 2e^{\frac{Gt}{2\eta(1+\nu)}} \eta(1+\nu) \epsilon_{xz}. \end{aligned} \tag{2}$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ - компоненти нормальних деформацій та деформацій зсуву, Па; G - модуль зсуву, Па; $G = E/(2(1+\nu))$; E - модуль пружності лінійних деформацій, Па; ν - коефіцієнт Пуассона; $\epsilon = 1/3(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)$, де $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ - компоненти лінійних деформацій, $1/c$; $\epsilon_{xy}, \epsilon_{xz}, \epsilon_{yz}$ - компоненти деформацій зсуву, $1/c$; η - модуль в'язкості зсувних деформацій, Па·с.

При цьому в рівняннях (2) прийняті наступні позначення: для компонент напружень

$$\sigma_{xl} \rightarrow \sigma_x, \sigma_{yl} \rightarrow \sigma_y, \sigma_{zl} \rightarrow \sigma_z, \tau_{xyl} \rightarrow \tau_{xy}, \tau_{xzl} \rightarrow \tau_{xz}, \tau_{yzl} \rightarrow \tau_{yz},$$

а для компонент швидкостей відносних деформацій $\epsilon_{xl} \rightarrow \epsilon_x, \epsilon_{yl} \rightarrow \epsilon_y, \epsilon_{zl} \rightarrow \epsilon_z, \epsilon_{xyl} \rightarrow \epsilon_{xy}, \epsilon_{xzl} \rightarrow \epsilon_{xz}, \epsilon_{yzl} \rightarrow \epsilon_{yz}$. В цьому випадку значення компонент напружень у ґрунті визначаються залежностями:

$$\sigma_x = \frac{2e^{\frac{GL}{\sqrt{2\eta_1} \sqrt{\frac{G-G\nu}{\rho-2\nu\rho}}}} \eta_1 (\epsilon_x (5-7\nu) + 2(\epsilon_y + \epsilon_z) (-2+\nu))}{9(-1+\nu)};$$

$$\sigma_y = \frac{2e \frac{GL}{\sqrt{2}\eta_1 \sqrt{\frac{G-G\nu}{\rho-2\nu\rho}}} \eta_1 (\sigma_{xl} (5-7\nu) + 2(\sigma_{xl} + \sigma_{zl})(-2+\nu))}{9(-1+\nu)};$$

$$\sigma_z = \frac{2e \frac{GL}{\sqrt{2}\eta_1 \sqrt{\frac{G-G\nu}{\rho-2\nu\rho}}} \eta_1 (\sigma_{zl} (5-7\nu) + 2(\sigma_{xl} + \sigma_{yl})(-2+\nu))}{9(-1+\nu)};$$

$$\tau_{xyl} = 2e \frac{GL}{\sqrt{2}\eta_1 \sqrt{\frac{G-G\nu}{\rho-2\nu\rho}}} \tau_{xyl} \eta_1; \quad \tau_{yzl} = 2e \frac{GL}{\sqrt{2}\eta_1 \sqrt{\frac{G-G\nu}{\rho-2\nu\rho}}} \tau_{yzl} \eta_1;$$

$$\tau_{xzl} = 2e \frac{GL}{\sqrt{2}\eta_1 \sqrt{\frac{G-G\nu}{\rho-2\nu\rho}}} \tau_{xzl} \eta_1,$$

де η_1 модуль в'язкості ґрунту, L - відстань розповсюдження хвиль напружень у ґрунті.

Остаточні вирази для визначення компонент напружень, що включені до рівнянь (3), отримані нами з використанням пакету прикладної програми Mathematica (у статті не наводимо через значні об'єми виразів).

Слід відзначити, що самі по собі значення величин компонент напружень у ґрунті не дають повної інформації про зміни його властивостей і можливі порушення його суцільності, тобто руйнування або ущільнення. Про характер цих змін може свідчити величини інтенсивності дотичних напружень, або найбільш інформативний показник вигляду напружено-деформованого стану, такий як критерій Лоде-Надаї. Використання такого критерія викликає певні труднощі через складність його запису, що складається з трансцендентної функції співвідношення першого та другого інваріантів девіаторів напружень. При цьому існує спрощений критерій [Ковбаса, Швайко, Гуцол 2015], що має вигляд:

$$\mu\sigma_1 = \frac{\sqrt{3}(\sigma_{xl} + \sigma_{yl} + \sigma_{zl})}{2\sqrt{\tau_{xyl}^2 + \tau_{xzl}^2 + \tau_{yzl}^2}};$$

$$\mu\tau = \frac{\sqrt{3}(\tau_{xl} + \tau_{yl} + \tau_{zl})}{2\sqrt{\tau_{xyl}^2 + \tau_{xzl}^2 + \tau_{yzl}^2}},$$

де $\mu\sigma_1$ - спрощений критерій вигляду напруженого стану, $\mu\tau$ - спрощений критерій вигляду деформованого стану, який в залежності від його величини та знаку трактується наступним чином:

- при $\mu\sigma_1 > 0$ - переважає деформація розтягу, причому чим більша величина $\mu\sigma_1$ тим більше розтяг;

- при $\mu\sigma_l < 0$ - переважає стиснення, причому чим менша величина $\mu\sigma_l$ тим більше стиснення;

- при $\mu\sigma_l = 0$ - проявляється чистий зсув.

З метою отримання наглядної картини впливу параметрів лемішної частини викопуючого робочого органу на напрям змін властивостей ґрунту нами отримано контурні графіки ізоліній величини вигляду його напруженого стану за умови впливу на нього леміша з різними параметрами.

Графіки отримано з використанням прикладної програми Mathematica за умови зміни величин коефіцієнтів, які входять у рівняння поверхні леміша та поверхні, в якій розміщені сепарувальні прутки (рівняння 1). Нижче наведемо деякі отримані контурні графіки.

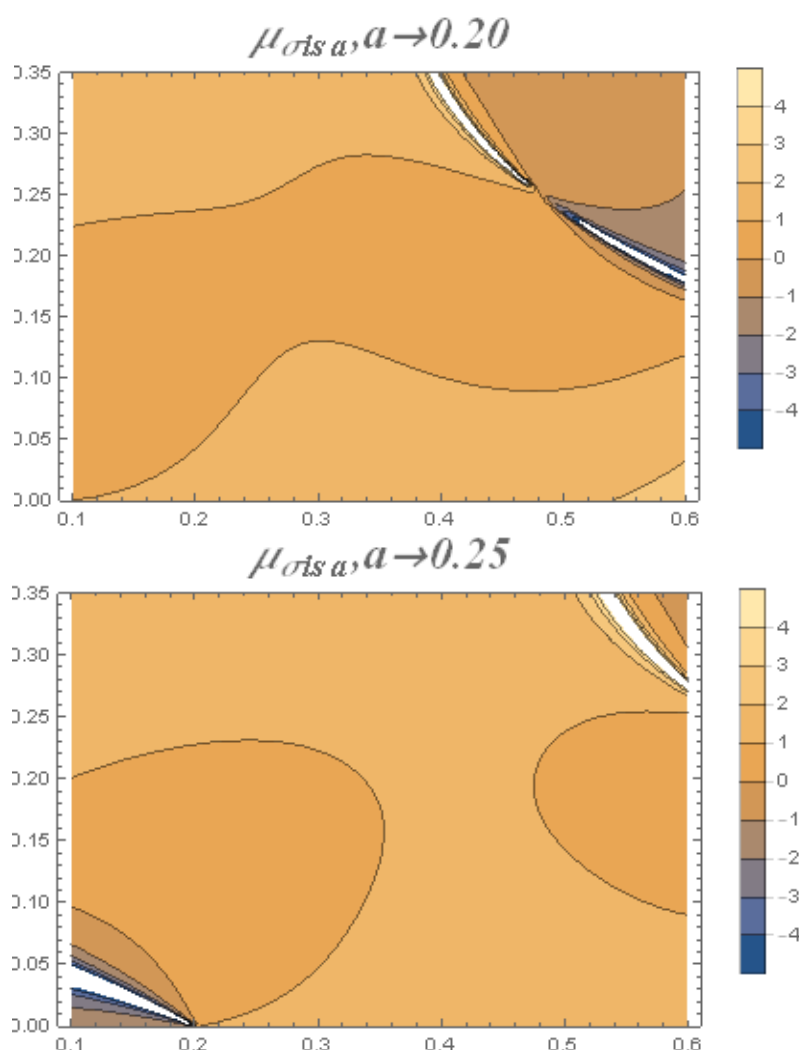


Рисунок 2 - Графічні залежності змін вигляду напруженого стану у ґрунті перед лемішем при зміні параметру a , (вертикальна вісь - z , горизонтальна - x), при $\nu \rightarrow 0.37 / \rho \rightarrow 1400 / E \rightarrow 10^7 / \eta_1 \rightarrow 510^3 / L \rightarrow 1 / V_m \rightarrow 1 / s \rightarrow 0.2 / b \rightarrow 1.5 / c \rightarrow 0.951 / \phi \rightarrow 0.25 / \kappa \rightarrow 1.5 / d \rightarrow -0.15 / bl \rightarrow 0.25 / h \rightarrow 0.25 / \delta \rightarrow 0.0005$

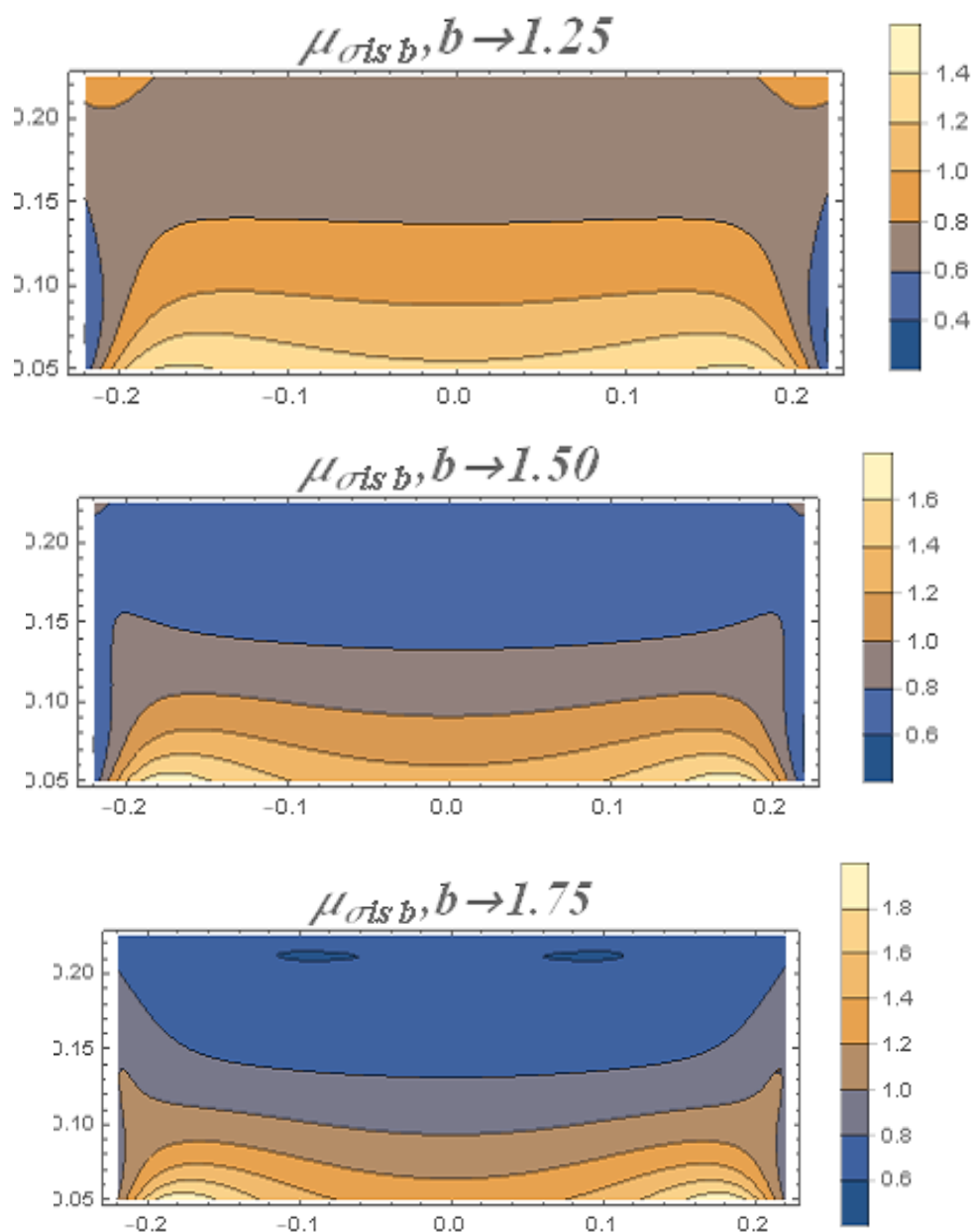


Рисунок 3 - Графічні залежності змін вигляду напруженого стану у ґрунті перед лемішем при зміні параметру b , (вертикальна вісь - z , горизонтальна - x), при

$$/v \rightarrow 0.37 / .\rho \rightarrow 1400 / .EE \rightarrow 10^7 / .\eta_1 \rightarrow 5 \cdot 10^3$$

$$/L \rightarrow 1 / .Vm \rightarrow 1 / .s \rightarrow 0.2 / .a \rightarrow 0.2 / .c \rightarrow 0.951$$

$$/.\phi \rightarrow 0.25 / .\kappa \rightarrow 1.5 / .d \rightarrow -0.15 / .bl \rightarrow 0.25 / .h \rightarrow 0.25$$

$$/.\delta \rightarrow 0.0005$$

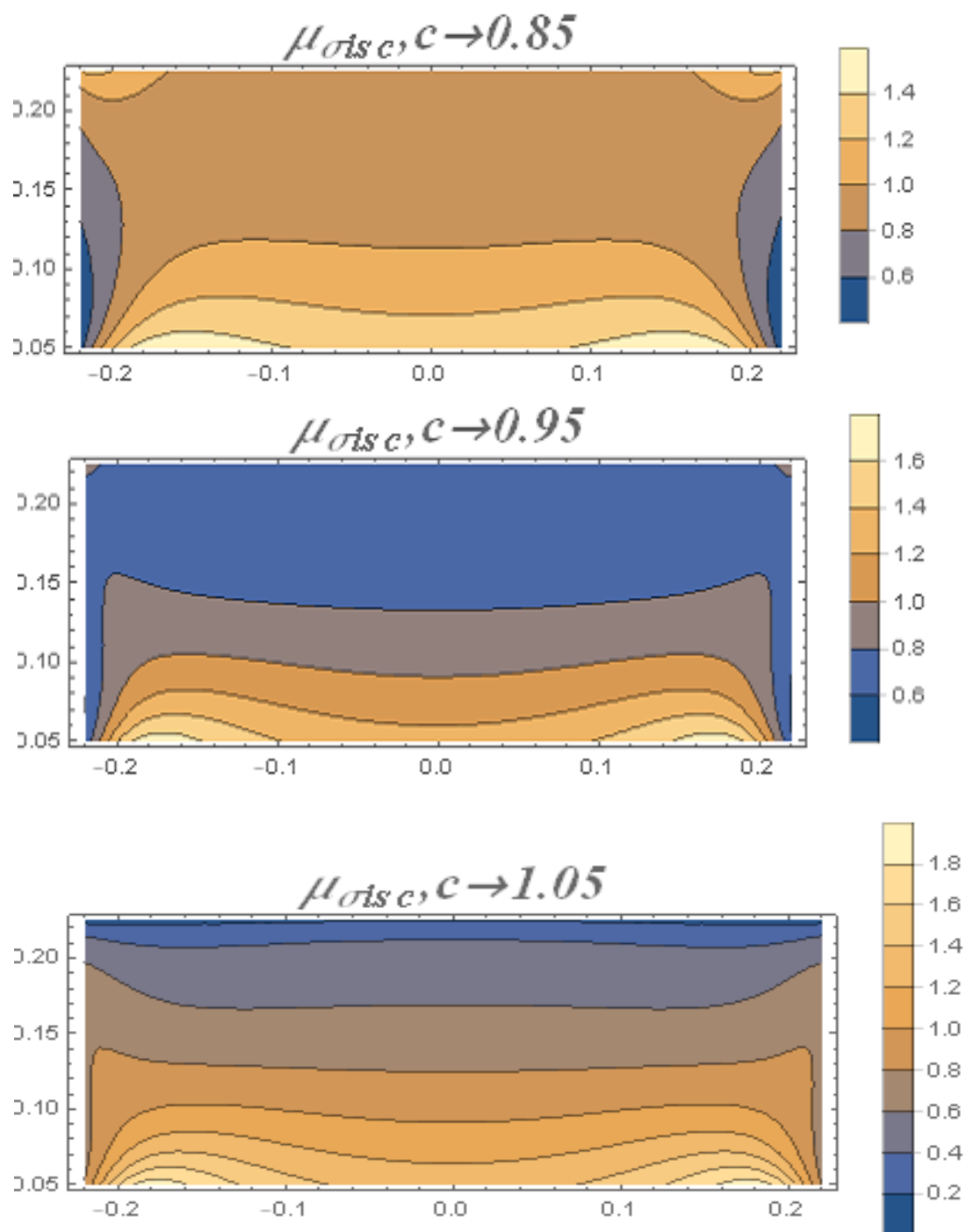


Рисунок 4 - Графічні залежності змін вигляду напруженого стану у ґрунті перед лемішем при зміні параметру c , (вертикальна вісь - z , горизонтальна - x), при

$$/\nu \rightarrow 0.37 / \rho \rightarrow 1400 / EE \rightarrow 10^7 / \eta_1 \rightarrow 5 \cdot 10^3$$

$$/L \rightarrow 1 / Vm \rightarrow 1 / s \rightarrow 0.2 / a \rightarrow 0.2 / b \rightarrow 1.5$$

$$/\phi \rightarrow 0.25 / \kappa \rightarrow 1.5 / d \rightarrow -0.15 / bl \rightarrow 0.25 / h \rightarrow 0.25 / \delta \rightarrow 0.0005$$

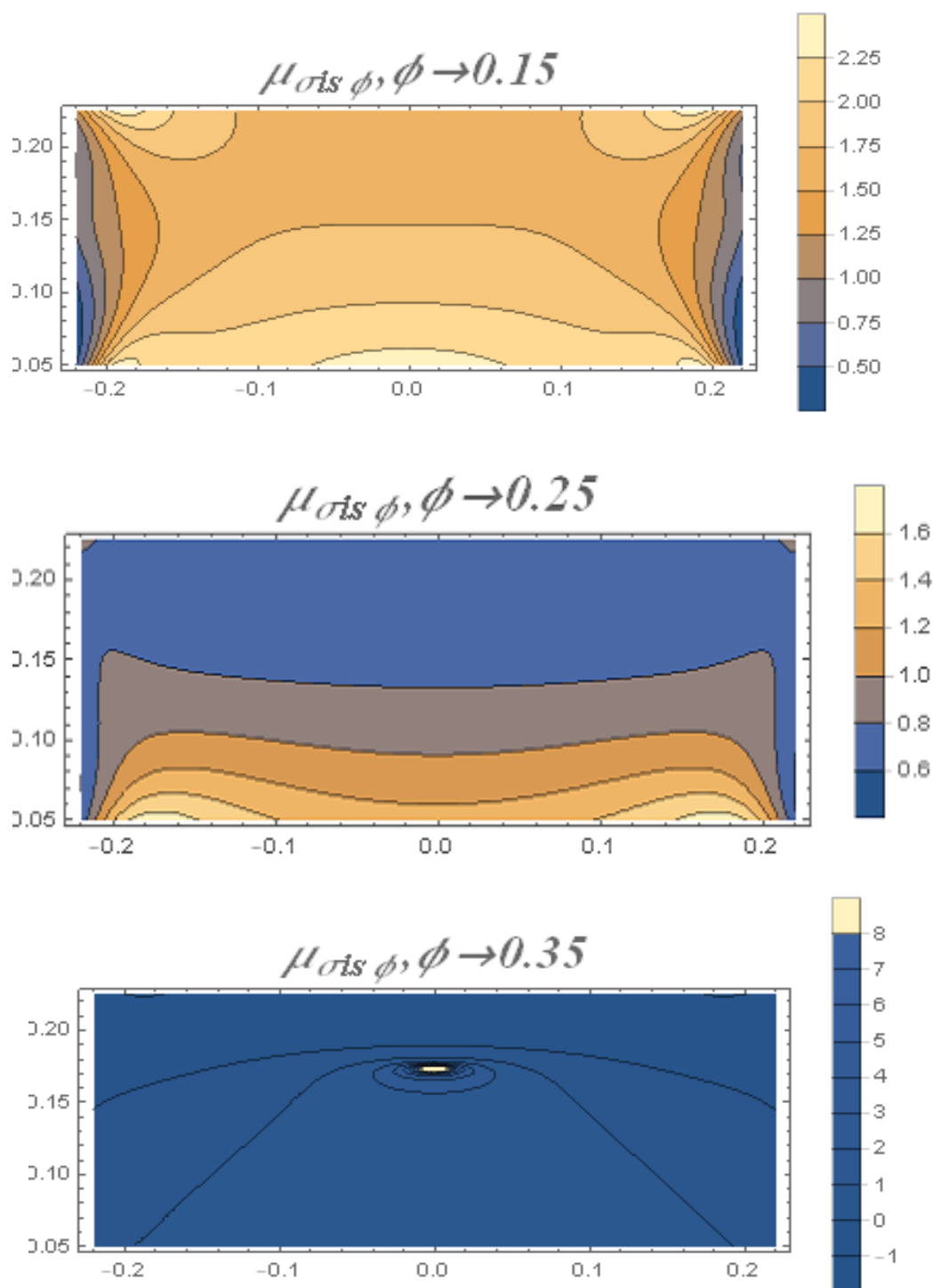


Рисунок 5 - Графічні залежності змін вигляду напруженого стану у ґрунті перед лемішем при зміні параметру ϕ , (вертикальна вісь - z , горизонтальна - x), при

$$/v \rightarrow 0.37 / .\rho \rightarrow 1400 / .EE \rightarrow 10^7 / .\eta_1 \rightarrow 5 \cdot 10^3$$

$$/L \rightarrow 1 / .Vm \rightarrow 1 / .s \rightarrow 0.2 / .a \rightarrow 0.2 / .b \rightarrow 1.5$$

$$/c \rightarrow 0.951 / .\kappa \rightarrow 1.5 / .d \rightarrow -0.15 / .bl \rightarrow 0.25 / .h \rightarrow 0.25 / .\delta \rightarrow 0.0005;$$

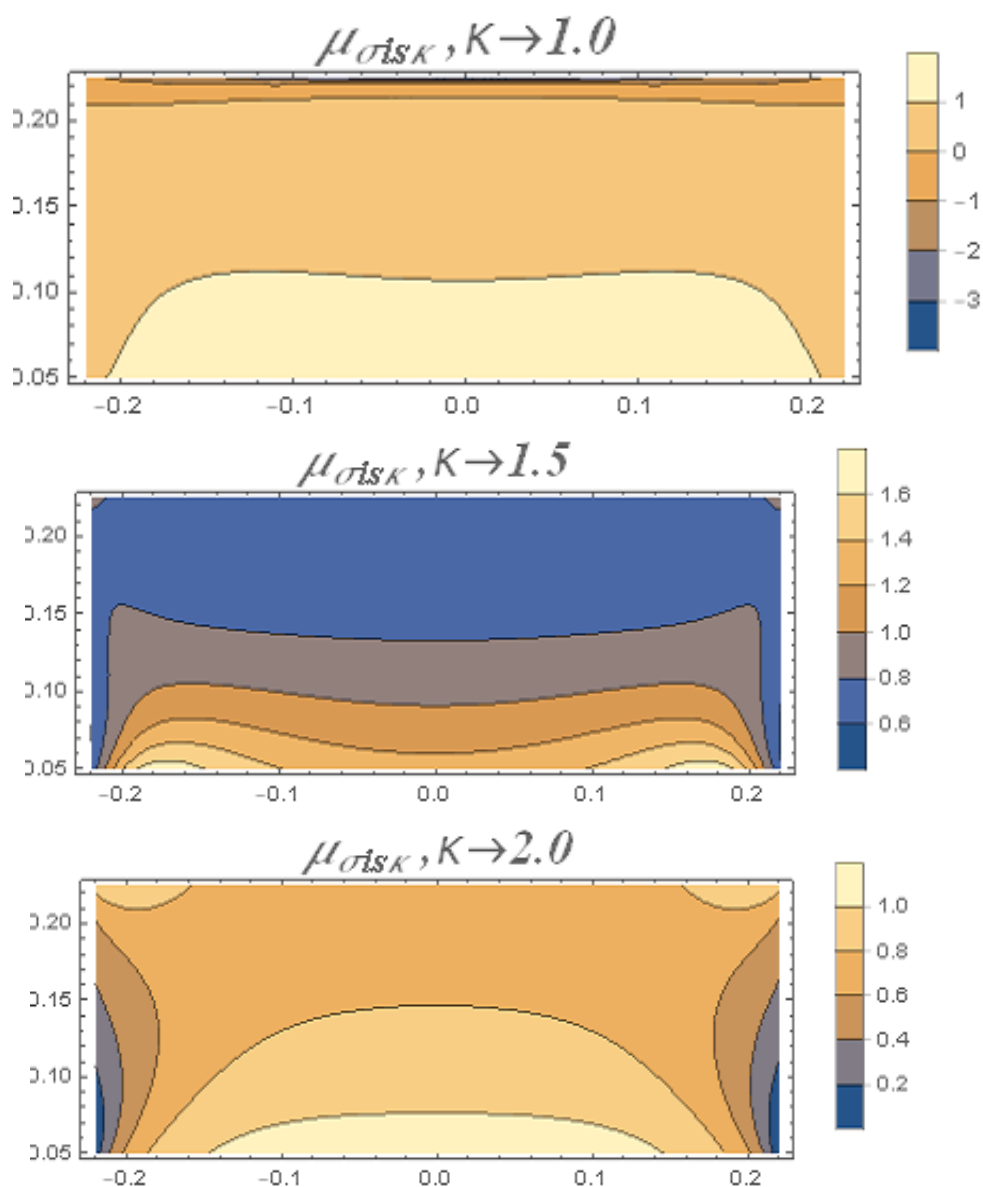


Рисунок 6 - Графічні залежності змін вигляду напруженого стану у ґрунті перед лемішем при зміні параметру K , (вертикальна вісь - z , горизонтальна - x), при

$$\nu \rightarrow 0.37 / \rho \rightarrow 1400 / EE \rightarrow 10^7 / \eta_1 \rightarrow 5 \cdot 10^3$$

$$/L \rightarrow 1 / Vm \rightarrow 1 / s \rightarrow 0.2 / a \rightarrow 0.2 / b \rightarrow 1.5$$

$$/c \rightarrow 0.951 / \phi \rightarrow 0.25 / d \rightarrow -0.15 / bl \rightarrow 0.25 / h \rightarrow 0.25 / \delta \rightarrow 0.0005$$

Висновки. Аналіз отриманих графічних залежностей та результатів виконаних аналітичних розрахунків дозволив зробити наступні висновки:

1) для забезпечення найбільшої зони розпушення ґрунту параметр a повинен становити 0,2;

2) величина параметру b (рис. 3) приймається в межах від 1.50 до 1.75. Враховуючи що даний параметр визначає кривизну леміша в напрямку, поперечному до напрямку руху, подальше його збільшення приведе до

зменшення висоти «стінок» викопувача, а це призведе до зростання ущільнення в зонах «стінок»;

3) збільшення параметра поверхні c (рис. 4), який визначає поздовжній кут нахилу поверхні, призведе до зростання кута входження леміша у ґрунт, при цьому зменшується величина критерію вигляду напруженого стану, що веде до зростання довжини леміша для забезпечення необхідної глибини ходу. Виходячи з цих міркувань параметр $c = 0.95$ може вважатися раціональним;

4) величина параметру ϕ (рис. 5) повинна знаходитись в межах $\phi = 0.25$, оскільки її зменшення хоч і впливає позитивно на збільшення зони розпушення, але при цьому не забезпечується необхідна глибина ходу робочого органу, а збільшення цієї величини веде до переущільнення ґрунту;

5) найбільш раціональним значенням параметру k слід вважати його величину $k = 1.5$, що видно з аналізу зон розподілу вигляду напруженого стану на рис. 6.

Отримані результати є підґрунтям для подальших досліджень, які передбачають встановлення геометричних параметрів запропонованого робочого органу: діаметра прутків сепарувальної частини, їхньої кількості, відстані між ними, а також оцінювання енергоємності процесу копання бульб картоплі з використанням робочого органу.

Література

- Ковбаса, В. П., Швайко, В. М. & Гуцол, О. П. (2015). *Механіка сільськогосподарських матеріалів та середовищ* [Текст]: навчальний посібник - Київ : Лисенко М. М., 536 с. - ISBN 978-617-640-175-9
- Кострицин, О. К. (1986). *Основные закономерности сопротивления почвы деформации и разрушению и их исследование для обоснования типа и параметров почвообрабатывающих противозерозионных рабочих органов*. дис. докт. техн. наук : 05.20.01. М., 356 с.
- Кушнарьюв, А. С. (1980). *Механико-технологические основы процесса воздействия рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий на почву*: дис. докт. техн. наук : 05.20.01. Мелітополь, 329 с.
- Мировой рынок картофеля (2016). [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-kartofela/>
- Петров, Д. Г. (1989). *Повышение эффективности сельскохозяйственных агрегатов за счет оснащения прицепных сельскохозяйственных машин двигателями (на примере картофелеуборочного комбайна)*: авторефер. дис. канд. техн. наук. – М., 22 с.
- Попов, А. А. (1984). *Повышение качества работы фрикционных сепараторов картофелеуборочных машин*: авторефер. дис. канд. техн. наук. – Челябинск: ЧИМЭСХ, 22 с.
- Пшеченков, К. А., Колчин, Н. Н. & Мальцев, С. В. (2012). Технологии и средства механизации для уборки и послеуборочной доработки картофеля / *Картофель и овощи*. – № 5, С. 8 - 10.
- Рослинництво України: статистичний збірник (2018). – Київ: Державна служба статистики України, 222 с. – (Нормативні документи).
- Amare, D., Kidanemariam, G., Endalew, W. & Yilma, S. (2015). Potato Harvester for Smallholder Producers. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*. Vol.3, No. 6, 2015, pp. 103-108. Retrieved from: 10.11648/j.ijmea.20150306.11

- Ayalew, T., Paul, C.S., Hirpa, A. (2014). Characterization of seed potato (*Solanum tuberosum* L.) Storage, pre-planting treatment and marketing systems. The case of West Arsi. *Afr J Agric Res. Vol. 9(15)*. ISSN 1991-637X – pp 1218–26. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2013.8572>
- Chase, R. W., Thompson, N. R., Ledebuhr, R. L., Hansen, C. M. & Kitchen, R. B. (1978). Plot harvester for potatoes. - *American Potato Journal. Vol. 55*, Issue 4, pp 235-237. Retrieved from: [org/10.1007/BF03044531](http://dx.doi.org/10.1007/BF03044531)
- Devaux, A., Kromann, P. & Ortiz, O. (2014). *Potatoes for sustainable global food security-* Potato Research. (Netherlands). 57(3-4): 185-199. ISSN 0014-3065. Retrieved from: [org/10.1007/s11540-014-9265-1](http://dx.doi.org/10.1007/s11540-014-9265-1)
- Kibar, H. (2012). *Design and management of postharvest potato (Solanum tuberosum L.) storage structures* - Ordu Univ. J. Sci. Tech Vol. 2, No, 1, pp 23-48
- Misener, G. C. & McMillan, L. P. (1982). A single-hill potato digger - *American Potato Journal. Vol. 59*, Issue 11, pp 551-553. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/BF02852604>
- Misener, G. C. & McMillan, L. P. (1987). A bulk potato trailer for research plots. - *American Potato Journal. Vol. 64*. pp 403-407. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/BF02853702>
- Piatt, H. W., Campbell, A. J., Birt, I. & MacKinnon, B. (1990). Modifications of a potato harvester for small plot field research. *American Potato Journal. Vol. 67*, Issue 11, pp 799-803. [doi.org/10.1007/BF03044531](http://dx.doi.org/10.1007/BF03044531)

References

- Amare, D., Kidanemariam, G., Endalew, W. & Yilma, S. (2015). Potato Harvester for Smallholder Producers. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Vol.3*, No. 6, 2015, pp. 103-108. Retrieved from: [10.11648/j.ijmea.20150306.11](http://dx.doi.org/10.11648/j.ijmea.20150306.11)
- Ayalew, T., Paul, C.S., Hirpa, A. (2014). Characterization of seed potato (*Solanum tuberosum* L.) Storage, pre-planting treatment and marketing systems. The case of West Arsi. *Afr J Agric Res. Vol. 9(15)*. ISSN 1991-637X – pp 1218–26. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.5897/AJAR2013.8572>
- Chase, R. W., Thompson, N. R., Ledebuhr, R. L., Hansen, C. M. & Kitchen, R. B. (1978). Plot harvester for potatoes. - *American Potato Journal. Vol. 55*, Issue 4, pp 235-237. Retrieved from: [org/10.1007/BF03044531](http://dx.doi.org/10.1007/BF03044531)
- Devaux, A., Kromann, P. & Ortiz, O. (2014). *Potatoes for sustainable global food security-* Potato Research. (Netherlands). 57(3-4): 185-199. ISSN 0014-3065. Retrieved from: [org/10.1007/s11540-014-9265-1](http://dx.doi.org/10.1007/s11540-014-9265-1)
- Kibar, H. (2012). *Design and management of postharvest potato (Solanum tuberosum L.) storage structures* - Ordu Univ. J. Sci. Tech Vol. 2, No, 1, pp 23-48
- Kostrыtsyn, O. K. (1986) *Osnovnye zakonomernosti soprotivleniya pochvy deformatsii i razrushenyyu i ih isledovaniya dlya obosnovaniya tipa i parametrov pochvoobrabatvayushchih protiverozionnyh rabochih organov*. Doctor's thesis. Moscow, Russia.
- Kovbasa, V. P. (2015). *Mehanika silskohospodarskikh materialiv ta seredovyshch* Kyiv, Ukraine.
- Kushnariov, A. S. (1980). *Mehaniko-tehnolohicheskie osnovy protsesa vozdejstviya rabochih organov pochvoobrabatvayushchih mashyn i orudij na pochvu*: Doctor's thesis. Melitopol, Ukraine.

- Misener, G. C. & McMillan, L. P. (1982). A single-hill potato digger - *American Potato Journal*. Vol. 59, Issue 11, pp 551-553. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/BF02852604>
- Misener, G. C. & McMillan, L. P. (1987). A bulk potato trailer for research plots. - *American Potato Journal*. Vol. 64. pp 403-407. Retrieved from: <https://doi.org/10.1007/BF02853702>
- Petrov, D. G. (1989). *Povisheniya effektivnosti selskohozyajstvennyh ahreatov za shchet osnashcheniya pricepnyh selskohozyajstvennyh mashyn dvizhytelyami (na primere kartofeleuborochnogo kombajna)*: Extended abstract of candidate's thesis. Moscow, Russia.
- Piatt, H. W., Campbell, A. J., Birt, I. & MacKinnon, B. (1990). Modifications of a potato harvester for small plot field research. *American Potato Journal*. Vol. 67, Issue 11, pp 799-803. doi.org/10.1007/BF03044531
- Popov, A. A. (1984). *Povisheniya kachestva raboty frikcionnyh separatorov kartofeleuborochnykh mashyn*: Extended abstract of candidate's thesis. Chelyabinsk: CIMEA.
- Pshechnikov, K. A., Kolchyn, N. N. & Mal'cev, S. V. (2012). Tehnologiya i sredstva dlya uborki i posleuborochnoj dorabotki kartodelya // *Potatoes and vegetables*. Vereya, Russia: 5, 8-10.
- Roslynnystvo Ukrainy: statystychnyj zbirnyk* (2018). Kyiv, derzhavna sluzhba statistiki Ukrainy, p. 222
- Sajt Mezhdunarodnoho nezavisimoho insitituta ahrarnoj politiki. Mirovoj rynek kartofelya* [Site of International Independent Institute of Agricultural Policy]. Retrieved from: <http://xn--80aplem.xn--p1ai>. Retrieved from <http://xn--80aplem.xn--p1ai/analytics/Mirovoj-rynok-kartofela/>

Data przesłania artykułu do Redakcji: 06.06.2018
Data akceptacji artykułu przez Redakcję: 18.06.2018