

д. т. н., професор **Ванін В. В.**,

fmf@kpi.ua, ORCID: 0000-0001-7008-7269

д. т. н., с. н. с. **Волоха М. П.**,

volmp@i.ua, ORCID: 0000-0002-0112-7324

ст. викладач **Лазарчук М. В.**,

mlazarchuk@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6192-6825

ст. викладач **Баскова Г. В.**,

baskovagv31@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3385-8404

ст. викладач **Міхлевська Н. В.**,

natavikmih@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3579-2055

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ СІВАЛКИ-КУЛЬТИВАТОРА ДЛЯ СОЇ

Соя є однією з найпоширеніших зернобобових культур і нині вирощується більш ніж в шестидесяти країнах світу, у тому числі завдяки екологічній пластичності. Збільшення виробництва сої, зокрема в нашій країні, відбувається головним чином шляхом розширення посівних площ за рахунок зменшення посівів зернових злакових та деяких енергоємних технічних культур. В зоні Лісостепу України рентабельність вирощування сої стабільно має позитивні показники (до 90-120 %), що уможливорює її високоефективне виробництво як для внутрішніх потреб, так і на експорт.

Сіють сою рядковим способом зазвичай (до 90 % площ) зерновими сівалками СЗ-3,6. На підставі проведеного аналізу існуючих технологій та засобів механізації сівби зернових встановлено, що вони не повною мірою відповідають агротехнічним вимогам для посіву сої та потребують удосконалення. Головна задача проведення агротехнічних заходів при сівбі загалом полягає у створенні оптимальної площі живлення шляхом рівномірного за глибиною загортання у ґрунт і розміщення на площі поля та забезпеченні умов для швидкого та міцного проростання насіння, що має вирішальне значення для гарного розвитку рослин, росту та, зрештою, врожайності. Обмежувальним фактором отримання одночасних дружних сходів сої, крім тепла, є вологість ґрунту. Саме для “підтягування” вологи з глибини до поверхні ґрунту під час висіву насіння застосовується коткування, хоча такий технологічний прийом є предметом дискусії серед дослідників та фермерів, адже наслідком може бути значне підвищення твердості поверхневого шару ґрунту, особливо після злив та наступного різкого потепління.

Встановлено, що робочим органом, який дозволяє якісніше

виконувати посів сої, є дисковий сошник на паралелограмній підвісці із встановленими до нього і після прикочувальними котками. Стаття містить теоретичні дослідження в напрямку перерозподілу навантажень за такої схеми зусиль та їх впливу на показники якості виконання технологічного процесу сівби, що може бути складовою частиною математичного апарату для автоматизованого проєктування ґрунтообробних та посівних знарядь.

Аналіз зміни навантаження на сошник з прикочувальними колесами можна рекомендувати при використанні сівалок такого типу для сівби інших культур.

Ключові слова: рівняння рівноваги; сила опору коченню; реакція ґрунту; сівалка-культиватор; сошник; насіння; соя;

Постановка проблеми. Встановлено, що сівба сої зерновими сівалками призводить до недостатньої рівномірності глибини загортання у ґрунт та інтервалів розміщення насіння вздовж рядка, адже біля 60-70 % насіння потрапляє в умови зайво загущених або зріджених, що негативно позначається на врожайності. У вирішенні завдання підвищення врожайності сої важлива роль належить комбінованим агрегатам, призначеним для обробки ґрунту в одній операції з висівом насіння. Проблема вдосконалення існуючих, розробка та дослідження нових робочих органів комбінованого типу, що забезпечують якісне виконання технологічних операцій з передпосівного обробки ґрунту одночасно з висівом насіння та прикочуванням засіяних рядків, є дуже актуальною і має важливе значення для сільгоспвиробників, особливо за умови неякісно підготовлених до сівби ґрунтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливість післяпосівного коткування для покращення контакту насіння з ґрунтом, що призвело до збільшення сходів зернових на 4% і, як наслідок, урожайності зерна на 2%, відмічається в роботі [1]. Подібні висновки були отримані щодо вирощування цукрових буряків [2, 3], хоча вплив коткування ґрунту на схожість насіння цукрових буряків був неоднозначним і залежав від умов зволоження ґрунту під час коткування та проростання насіння. Своєчасне коткування ґрунту, особливо після сівби, покращувало схожість насіння в посушливу весну і погіршувало у вологу пору року. Затримка зміцнення пересушеного ґрунту також була шкідливою. У досліджах Хоканссона на дослідних ділянках з високим початковим вмістом води проростання насіння затримувалося закріпленням. Реакція цукрових буряків на зміцнення насінневого ложа після сівби була дуже схожа на реакцію дрібнозернових культур [4].

Коткування під час сівби підвищує вміст мілких фракцій у структурному складі поверхневого шару ґрунту, що є одним із найважливіших параметрів при сівбі дрібнозернових

сільськогосподарських культур. Найціннішими є ґрунтові агрегати насінневого ложа розміром 2–5 мм. Інакше в посівних ложах принаймні 50% ґрунтових агрегатів має бути менше 5 мм [5, 6]. За даними Морріс та ін. [7] об'єм такого агрегованого ґрунту може становити до 33%. Після аналізу результатів попередніх експериментів Романецькаса та Шараускіса [8, 9] було виявлено, що вимоги до розподілу агрегатів за розміром насінневого ложа цукрових буряків (згідно з відомою моделлю Хейнонена–Кріца–Хаканссона) краще задовольнялися, коли насінневе ложе було готують за допомогою культиватора з котками.

У статті литовських дослідників на чолі з проф. Романецькасом (2022) зазначено, що глибина посіву або посівного ложа є важливим агротехнологічним параметром, який змінюється в залежності від конкретного ґрунту поля та мікрокліматичних умов і водночас залежить від біології культури. Автори відмічають, що незважаючи на останні дослідження декількох конструкцій сівалок і методів визначення умов сівби та регулювання глибини високоточними системами висіву з цифровим фоном безпосередньо в полі, все ще існує прогалина в знаннях через обмежене використання цих технологій в умовах високої мінливості ґрунту та мікроклімату [1]. Результати приведених досліджень також показали, що в більшості випадків, коли глибина посіву перевищує оптимальну, вміст вологи в посівному ложі значно знижується. Глибина посіву корелювала з шорсткістю насінневого ложа (поверхні та дна) та розподілом агрегатних розмірів посівного ложа, але визначальними факторами були тип сошника та досконалість посівної техніки. Авторами огляду останніх досліджень, які торкаються даної теми [1], показано що на глибину загортання насіння регулювання сили прикочування впливає більше, ніж просторова мінливість ґрунту на полі чи робоча швидкість посівного агрегата [10].

Цілі та завдання статті. Метою статті є дослідження розподілу зусиль у механізмі посівної секції сівалки-культиватора з дисковим сошником, обладнаним додатковим прикочувальним колесом.

Робоча гіпотеза полягає в тому, що рівномірний розподіл насіння по глибині загортання при висіві дозволить підвищити польову схожість насіння та урожайність сої за рахунок одночасного ущільнення поверхневого шару ґрунту і створення оптимальних умов для росту та розвитку рослин.

Об'єктом дослідження є пристрій для здійснення технологічного процесу сівби сої з одночасним прикочуванням.

Основна частина. Для визначення сил, що діють на секцію сівалки-культиватора у процесі роботи, розглянемо її механізм у стані статичної рівноваги. На рис.1. показано всі зовнішні сили.

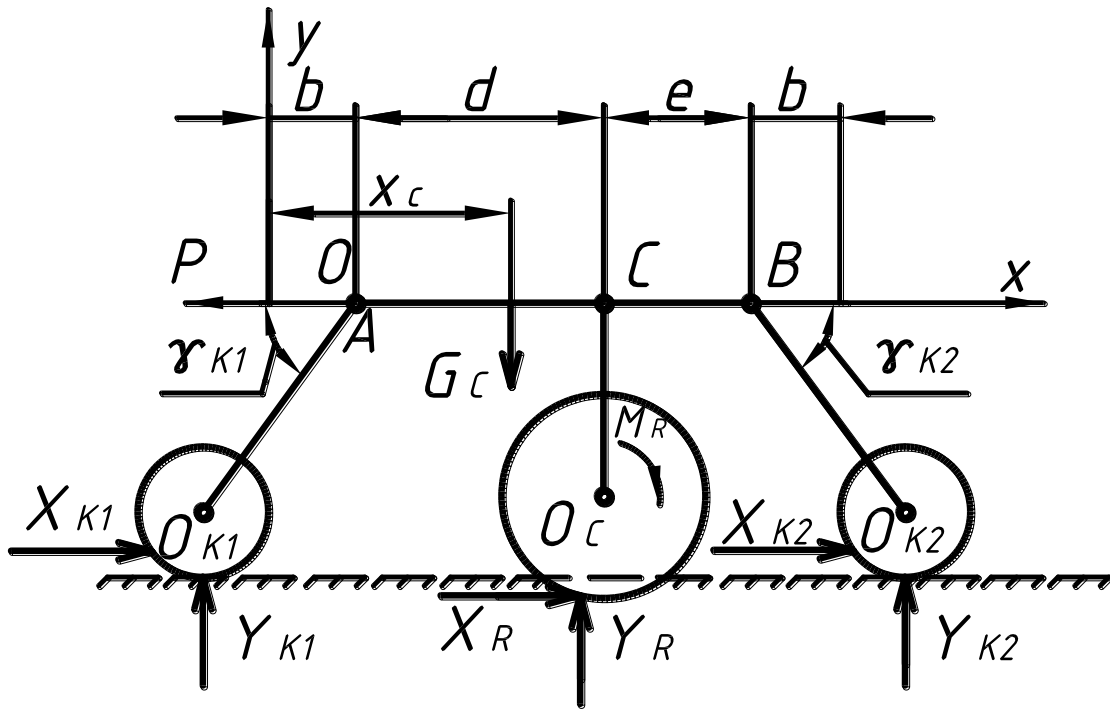


Рис 1. Розрахункова схема секції сівалки-культиватора з дисковим сошником

Напишемо три рівняння рівноваги механізму [11]:

$$\begin{aligned} \sum X = 0; X_{K1} + X_{K2} + X_R - P &= 0 \\ \sum Y = 0; Y_{K1} + Y_R + Y_{K2} - G_C &= 0 \\ \sum M_0 = 0; G_C x_c - X_{K1}(O_C C + r_c - h) - X_R y_R - X_{K2}(O_C C + r_c - h) + \\ &+ M_R - Y_{K2}(b + d + e + l_{K2} \cos \gamma_{K2}) + Y_{K1}(l_{K1} \cos \gamma_{K1} - b) \\ &- Y_R x_R = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

де X_{K1}, X_{K2} – сили опору коченню опорно-копіюючого і прикочувального коліс, Н;

X_R – горизонтальна складова реакції ґрунту на сошник, Н;

Y_{K1}, Y_{K2} – вертикальні реакції, що діють на опорно-копіювальне і прикочувальне колеса, Н;

Y_R – вертикальна складова реакції ґрунту на сошник, Н;

M_R – момент опору від сил тертя в підшипниках, для наших розрахунків приймаємо $M_R = 0$;

G_C – вага секції сівалки;

h – глибина загортання насіння, м;

L_{K1}, L_{K2} – довжини важелів опорно-копіювального та прикочувального коліс, м;

γ_{K1}, γ_{K2} – кути нахилу важелів опорно-копіюючого та прикочування коліс до горизонту, град.;

r_c – радіус диска сошника, м;

b, d, e – конструктивні параметри корпусу посівної секції, м;

x_R, y_R – горизонтальна і вертикальна відстані до точки докладання реакції ґрунту на сошник, м;

x_c – відстань до центру ваги секції, м;

O_cC – відстань від центру сошника до точки його кріплення на секції, м.

Сили X_{K1}, X_{K2} і Y_{K1}, Y_{K2} , а також сили Y_R і X_R пов'язані залежностями

$$X_{K1} = fY_{K1}; X_{K2} = fY_{K2}; X_R = kY_R \quad (2)$$

де f – коефіцієнт перекочування; k – тангенс кута нахилу до вертикалі результуючої реакції ґрунту на сошник

Величини x_R, y_R визначаються із рівнянь

$$x_R = b + d - r_c \sin \alpha; y_R = O_cC + r_c \cos \alpha \quad (3)$$

Розрахунки з визначення координат центру ваги секції, при змінних значеннях d , і e дали наступні результати:

$$x_c = 0,465 + 0,22d, \text{ м.}$$

Із викладеного вище маємо $X_R = Y_R \operatorname{tg} \alpha$

Перетворюємо отримані рівняння рівноваги виразивши горизонтальні складові реакцій через вертикальні складові:

$$\begin{aligned} fY_{K1} + fY_{K2} + kY_R - P &= 0 \\ Y_{K1} + Y_R + Y_{K2} - G_c &= 0 \\ C_c X_c - fY_{K1}(O_cC + r_c - h) - Y_{K2}(b + d + e + L_{K2} \cos \gamma_{K2}) + Y_{K1}(L_{K1} - b) - Y_R X_R &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Після проведення відповідних перетворень отримуємо:

$$Y_{K1} = \frac{69687 + 50P - 87Y_r P - 4,45 \times 10^5 f(1 - X_r) - 77430(d + e - fO_cC + fr_c - fh + L_{K2} \cos g_{K2}) + 500P(fO_cC + fr_c - fh - X_r L_{K2} \cos g_{K2} + d + e)}{50(f - 1) + 500(f^2 O_cC - fO_cC - fr_c + x_r + f^2 r_c + f^2 h - L_{K1} f \cos g_{K1}) - 413(L_{K2} \cos \gamma_{K2} + d) + 87(Y_r - Y_r f + L_{K1} \cos g_{K1}) + fh}$$

$$Y_{K2} = \frac{50P - 87Y_r P + 4,45 \times 10^5 X_r f O_cC + 77430(Y_r - fr_c + fh + L_{K1} \cos g_{K1}) + 500P(fO_cC + fr_c - fh - L_{K1} \cos g_{K1} + X_r) - 3,753 \times 10^5}{50(f - 1) + 500(f^2 O_cC - fO_cC - fr_c + x_r + x_r f + f^2 r_c + f^2 h - L_{K1} f \cos g_{K1}) - 413(L_{K2} \cos \gamma_{K2} + d - e) + 87(Y_r - Y_r f + L_{K1} \cos g_{K1}) + fh}$$

$$Y_R = \frac{50P - 87Y_r P + 4,45 \times 10^5 X_r f O_cC + 77430(Y_r - fr_c + fh + L_{K1} \cos g_{K1}) + 500P(fO_cC + fr_c - fh - L_{K1} \cos g_{K1} + X_r) - 3,753 \times 10^5}{50(f - 1) + 500(f^2 O_cC - fO_cC - fr_c + fh - X_r + f^2 r_c + f^2 h - L_{K1} f \cos g_{K1}) + 87(Y_r + Y_r - Y_r f + X_r f + L_{K1} \cos g_{K1}) - 413d}$$

З рис. 1. видно: $R_C = O_cC + r - h$, $R_{K2} = b + d + L_{K2} \cos \gamma_{K2}$, $R_{K1} =$

$$L_{K1} \cos g_{k1} - b$$

Відповідно до конструкції посівної секції серійної сівалки СЗ-3,6 можемо записати

$$R_C = 0,65 - h, R_{K2} = 1,325 \text{ м } R_{K1} = 0,025 \text{ м}$$

Розрахункові числові значення Y_{K1} , Y_{K2} , Y_R за різної глибини висіву h і відстані точки кріплення сошника $d = 0,7$ м приведені на рис. 2.

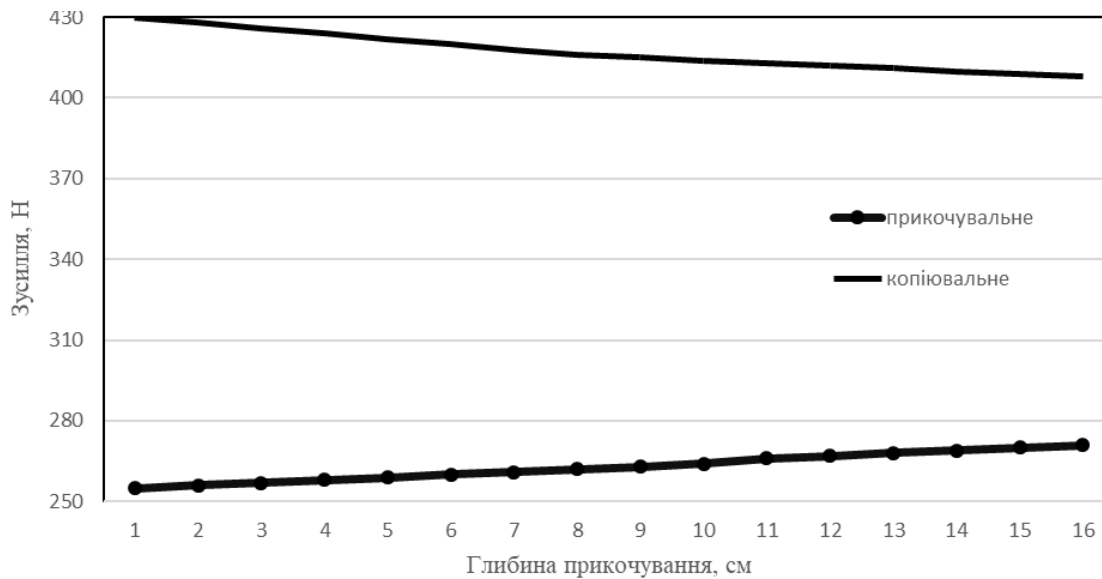


Рис. 2. Вплив глибини прикочування на зусилля реакції опорно-копіювального (Y_{K1}) та прикочувального (Y_{K2}) коліс

Як видно з графіків залежності навантаження мають лінійний характер. Зусилля на опорно-копіювальному колесі сошника майже вдвічі більше, ніж на прикочувальному, проте різниця помітно зменшується зі збільшенням глибини. Пояснюється це тим, що збільшення глибини обробки призводить до перерозподілу навантаження в сторону збільшення на заднє прикочувальне колесо. Вочевидь, такий же ефект отримаємо у разі збільшення відстані точки кріплення сошника d .

Висновки та перспективи досліджень.

На підставі проведеного аналізу існуючих технологій та засобів механізації сівби зернових встановлено, що вони не повною мірою відповідають агротехнічним вимогам для посіву сої та потребують удосконалення. Встановлено, що робочим органом, який дозволяє якісніше виконувати посів сої, є дисковий сошник на паралелограмній підвісці із встановленими до нього і після прикочувальними котками.

Практично всі геометричні параметри сівалки-культиватора впливають на перерозподіл реакцій у ланках секції.

Зусилля на сошнику не залежить від глибини висіву, а залежить від ваги посівної секції і тягового зусилля.

Чим ближче точка кріплення сошника до прикочувального колеса, тим більше значення зусилля прикочування, а значить і більше глибина прикочування. При значному зміщенні точки кріплення сошника, зусилля прикочування змінюється незначно, що можна вважати позитивним для даної конструкції сівалки, так як при несприятливих впливах на культиватор-сівалку, вона буде більш стійка і збереже свої технологічні параметри.

Аналіз зміни навантаження на сошник з прикочувальними колесами можна рекомендувати при використанні сівалок такого типу для сівби інших культур.

Література

1. *Romanekas K. et al.* How to Analyze, Detect and Adjust Variable Seedbed Depth in Site-Specific Sowing Systems: A Case Study. *Agronomy*. 2022, 12(5), 1092.
2. *Romanekas, K.; Šarauskis, E.* The influence of soil rolling time and methods on sugar beet seedbed formation. *Lucr. Stiintifice Ser. Agron.* 2006, 49, 125–139.
3. *Romanekas, K.; Šarauskis, E.; Pakulytė, N.; Tamulionis, A.* The investigations of sugar beet seedbeds under different depth and density formation methods. *Vagos* 2008, 78, 29–36.
4. *Håkansson, I.; Rydberg, T.; Keller, T.; Arvidsson, J.* Effects of seedbed properties on crop emergence. 3. Effects of firming of seedbeds with various sowing depths and water contents. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 2011, 61, 701–710.
5. *Håkansson, I.; Myrbeck, E.; Etana, A.* A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden. *Soil Tillage Res.* 2002, 64, 23–40.
6. *Håkansson, I.; Arvidsson, J.; Rydberg, T.* Effects of seedbed properties on crop emergence: 2. Effects of aggregate size, sowing depth and initial water content under dry weather conditions. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 2011, 61, 469–479.
7. *Morris, N.L.; Miller, P.C.H.; Orson, J.H.; Froud-Williams, R.J.* The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil Tillage Res.* 2010, 108, 1–15.
8. *Romanekas, K.; Šarauskis, E.* The investigations of sugar beet seedbed by Kritz method (Sweden) under different soil tillage and sowing pattern. *Zemdirbyste* 2003, 81, 168–183.
9. *Romanekas, K.; Šarauskis, E.* The investigation by the Kritz method of sugar beet seedbed under different soil tillage and sowing patterns in Lithuania. In Proceedings of the Soil Management for Sustainability: *International Soil Tillage Research Organisation 16th Triennial Conference, Brisbane, Australia*, 14–18 July 2003; pp. 1029–1035.

10. Bortoli, L. F., Arismendi, G. de A., Ferreira, M. M., Martin, T. N. (2021). Sowing speed can affect distribution and yield of soybean. *Australian Journal of Crop Science*, 15(1), 16–22.
11. Павловський М.А. Теоретична механіка. Київ: Техніка, 2002. 510 с.

References

1. Romaneckas K. et al. How to Analyze, Detect and Adjust Variable Seedbed Depth in Site-Specific Sowing Systems: A Case Study. *Agronomy*. 2022, 12(5), 1092. {in English}
2. Romaneckas, K.; Šarauskis, E. The influence of soil rolling time and methods on sugar beet seedbed formation. *Lucr. Stiintifice Ser. Agron.* 2006, 49, 125–139. (In Lithuanian with English Summary)
3. Romaneckas, K.; Šarauskis, E.; Pakulytė, N.; Tamulionis, A. The investigations of sugar beet seedbeds under different depth and density formation methods. *Vagos* 2008, 78, 29–36. {in English}
4. Håkansson, I.; Rydberg, T.; Keller, T.; Arvidsson, J. Effects of seedbed properties on crop emergence. 3. Effects of firming of seedbeds with various sowing depths and water contents. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 2011, 61, 701–710. {in English}
5. Håkansson, I.; Myrbeck, E.; Etana, A. A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden. *Soil. Tillage Res.* 2002, 64, 23–40. {in English}
6. Håkansson, I.; Arvidsson, J.; Rydberg, T. Effects of seedbed properties on crop emergence: 2. Effects of aggregate size, sowing depth and initial water content under dry weather conditions. *Acta Agric. Scand. B Soil Plant Sci.* 2011, 61, 469–479. {in English}
7. Morris, N.L.; Miller, P.C.H.; Orson, J.H.; Froud-Williams, R.J. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil Tillage Res.* 2010, 108, 1–15. {in English}
8. Romaneckas, K.; Šarauskis, E. The investigations of sugar beet seedbed by Kritz method (Sweden) under different soil tillage and sowing pattern. *Zemdirbyste* 2003, 81, 168–183. (In Lithuanian with English Summary)
9. Romaneckas, K.; Šarauskis, E. The investigation by the Kritz method of sugar beet seedbed under different soil tillage and sowing patterns in Lithuania. In Proceedings of the Soil Management for Sustainability: *International Soil Tillage Research Organisation 16th Triennial Conference, Brisbane, Australia*, 14–18 July 2003; pp. 1029–1035. {in English}
10. Bortoli, L. F., Arismendi, G. de A., Ferreira, M. M., Martin, T. N. (2021). Sowing speed can affect distribution and yield of soybean. *Australian Journal of Crop Science*, 15(1), 16–22. {in English}
11. Pavlovsky M.A. Theoretical mechanics. Kyiv: Technika, 2002. 510 s. {in Ukrainian}

Doctor of Technical Sciences, Professor **Volodymyr Vanin**,
fmf@kpi.ua, ORCID: 0000-0001-7008-7269
Doctor of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher **Mykola Volokha**,
volmp@i.ua, ORCID: 0000-0002-0112-7324
Senior Teacher **Margarita Lazarchuk**,
mlazarchuk@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6192-6825
Senior Teacher **Halyna Baskova**,
baskovagv31@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3385-8404
Senior Teacher **Natali Mihlevskaya**,
natavikmih@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3579-2055

National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

THEORETICAL STUDIES ON IMPROVEMENT OF THE COMBINED SOYBEAN SEEDER-CULTIVATOR

Soybeans are one of the most widespread leguminous crops and are currently grown in more than sixty countries, including due to their environmental plasticity. The increase in soybean production, in particular in our country, is mainly due to the expansion of sown areas by reducing the sowing of cereal grains and some energy-intensive industrial crops. In the Forest-Steppe zone of Ukraine, the profitability of soybean cultivation is consistently positive (up to 90-120%), which makes it possible to produce it efficiently both for domestic needs and for export.

Soybeans are usually sown in a row method (up to 90% of the area) with SZ-3.6 grain seeders. Based on the analysis of existing technologies and means of mechanization of grain sowing, it was found that they do not fully meet the agrotechnical requirements for soybean sowing and need to be improved. The main task of agrotechnical measures during sowing is to create an optimal nutrition area by uniform depth of seeding in the soil and placement on the field area and to provide conditions for fast and strong seed germination, which is crucial for good plant development, growth and, ultimately, yield. In addition to heat, soil moisture is a limiting factor in obtaining simultaneous, friendly soybean germination. Rolling is used to "pull" moisture from the depths to the soil surface during seed sowing, although this technique is a subject of debate among researchers and farmers, as it can result in a significant increase in the hardness of the surface soil layer, especially after heavy rains and subsequent sharp warming.

It has been established that the working body that allows for better soybean sowing is a disk coulter on a parallelogram suspension with packer rollers installed before and after it. The article contains theoretical studies on the redistribution of loads under such a force scheme and their impact on the quality indicators of the sowing process, which can be an integral part of the

mathematical apparatus for the automated design of tillage and sowing tools.

Almost all geometric parameters of the seeder-cultivator affect the redistribution of reactions in the links of the section.

The force on the coulter does not depend on the sowing depth, but on the weight of the sowing section and the traction force.

The closer the coulter attachment point is to the packer wheel, the greater the value of the pressing force, and thus the greater the depth of pressing. With a significant displacement of the coulter attachment point, the rolling force changes slightly, which can be considered positive for this design of the seeder, since in case of adverse effects on the cultivator-sower, it will be more stable and retain its technological parameters.

The analysis of the change in the load on the coulter with packer wheels can be recommended when using this type of seeder for sowing other crops.

Keywords: equilibrium equation; rolling resistance force; soil reaction; seeder-cultivator; coulter; seeds; soybeans;