



Механізація, електрифікація

УДК 631.333

© 2023

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ЧАСТИНКИ МІНЕРАЛЬНОГО ДОБРИВА ПО ВІДЦЕНТРОВОМУ РОБОЧОМУ ОРГАНУ, НАПРЯМЛЕНОМУ ПІД КУТОМ ДО ГОРИЗОНТУ

В.М. Булгаков¹, О.В. Адамчук², І.В. Головач³,
В.Т. Надикто⁴, О.М. Троханяк⁵

¹доктор технічних наук, професор, академік НААН

^{2,5}кандидати технічних наук

^{3,4}доктори технічних наук, професори, член-кореспонденти НААН

^{1,3,5}Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

²Державна служба України з питань безпеки харчових продуктів
та захисту споживачів (Держпродспоживслужба)
вул. Б. Грінченка, 1, м. Київ, 01001, Україна

⁴Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
просп. Б. Хмельницького, 18, м. Мелітополь Запорізької обл., 72312, Україна
e-mail: ¹vbulgakov@meta.ua, ²adamchuk-o-v@ukr.net, ³holovach.iv@gmail.com,

⁴volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua, ⁵klendii_o@ukr.net

ORCID: ¹0000-0003-3445-3721, ²0000-0003-2767-004X,

³0000-0003-1387-4789, ⁴0000-0002-1770-8297, ⁵0000-0002-4671-5824

Надійшла 11.06.2023

Мета. Обґрунтувати робочу ширину захвату машини для внесення мінеральних добрив та її продуктивність залежно від конструктивних і кінематичних параметрів, а також від місця подачі частинок мінерального добрива на поверхню напрямленого під кутом до горизонту розкидного диска, скориставшись результатами комп'ютерного аналізу руху частинки поверхнею диска відцентрового розкидача. **Методи.** Під час досліджень застосовували методи вищої математики, теоретичної механіки, математичного моделювання, стандартні і спеціально розроблені комп'ютерні програми для числових розрахунків отриманих моделей, а також методи аналізу графічних залежностей між конструктивними і кінематичними параметрами. **Результати.** Для розробленої конструкції відцентрового туковисівного апарата, вісь якого напрямлена під кутом до горизонтальної площини, на підставі побудованої математичної моделі руху частинки мінеральних добрив по диску вздовж лопатки нахиленого туковисівного робочого органу та її сходу з диска, за допомогою спеціальної комп'ютерної програми проаналізовано розгін частинки добрива від центру диска до його периферії. Комп'ютерне мо-

делювання цього процесу полягало у зміні конструктивних параметрів та кінематичних режимів роботи досліджуваного робочого органу. Побудовано нові графічні залежності переміщення та відносної швидкості руху частинки мінеральних добрив від часу, конструктивних та кінематичних параметрів робочого органу, а також від коефіцієнта тертя частинки по поверхні диска. За кінематичні та конструктивні параметри відцентрового робочого органу слугували кутова швидкість розкидного диска, його радіус, кут нахилу диска до горизонту, початковий радіус подачі частинки мінерального добрива на диск. Отримано графіки залежності абсолютної швидкості сходження частинки добрива з диска робочого органу від часу та зазначених вище параметрів, що зумовлюють дальність польоту частинки добрива після сходу з лопатки диска відцентрового робочого органу. Це дало змогу в кінцевому підсумку визначити робочу ширину захвату машини для внесення мінеральних добрив та її продуктивність. **Висновки.** Відносна швидкість сходження частинки мінеральних добрив з лопатки нахиленого туковисівного робочого органу не залежить від номера сектора, в якому здійснюється його живлення, і збільшується за зростання кутової швидкості диска та зменшення як радіуса подачі, так і коефіцієнта зовнішнього тертя добрив. Найбільший вплив на відносну швидкість сходження частинки добрива з лопатки робочого органу чинять кутова швидкість диска і радіус подачі. За коефіцієнта зовнішнього тертя добрив 0,3, радіуса подачі 0,1 м, кута нахилу диска до горизонтальної площини 30° і кутової швидкості диска 30, 60, 90 і 120 c^{-1} відносна швидкість сходження частинки мінерального добрива з лопатки нахиленого робочого органу відповідно становить 9; 17,5; 26,5 та $35 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. За кутової швидкості диска 90 c^{-1} і зазначених параметрів робочого органу та радіуса подачі добрив 0,1; 0,2 і 0,3 м відносна швидкість сходження частинки добрива з лопатки становить 26,5; 25 і $20 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. Значення радіуса подачі добрив не повинно перевищувати половини радіуса диска туковисівного робочого органу. Зміна кута нахилу диска робочого органу до горизонтальної площини в межах $0-40^\circ$ не впливає на час розгону частинок добрива та значення відносної й абсолютної швидкостей сходження його частинок з лопатки. Однак вона приводить, і це дуже важливо, до зміни кута між вектором абсолютної швидкості сходження частинки добрива та горизонтальною площиною. А це сприяє збільшенню дальності польоту добрива. Подачу добрива на нахилений туковисівний робочий орган доцільно здійснювати у секторі II його диска. Раціональні значення кута нахилу диска до горизонтальної площини перебувають у діапазоні $20-30^\circ$.

Ключові слова: мінеральні добрива, частинка, нахилений туковисівний диск, математична модель, розрахунок на ПК, комп'ютерний аналіз.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202307-05>

Серед різноманіття машин для внесення мінеральних добрив, що їх використовують у провідних країнах світу, домінують (понад 90%) машини, обладнані відцентровими робочими органами.

Розробники моделей машин для внесення мінеральних добрив на етапі створення

прагнуть насамперед забезпечити підвищення їх продуктивності. Продуктивність таких машин залежить від їхньої робочої ширини захвату, робочої швидкості агрегату та коефіцієнта використання змінного часу. Потенційні резерви підвищення їх продуктивності за рахунок збільшення робочої швидкості агрегату

вже вичерпані. Це стосується і коефіцієнта використання змінного часу. Отже, підвищення продуктивності машин можливе лише завдяки збільшенню робочої ширини захвату. Однак існують обмеження і стосовно збільшення кутової швидкості обертання туковисівних робочих органів через можливе руйнування гранул мінеральних добрив та утворення небажаної пиловидної фракції. Неможливо досягти бажаного результату і внаслідок збільшення висоти встановлення туковисівних робочих органів над поверхнею ґрунту. Підвищити продуктивність машин для внесення мінеральних добрив можна лише за рахунок збільшення робочої ширини захвату, і ця актуальна проблема потребує проведення конструкторських розробок та наукових досліджень.

Дослідженнями відцентрових дискових туковисівних робочих органів займалися як вітчизняні, так і закордонні вчені. Вони вивчали вплив різних форм елементів конструкції, кінематичних параметрів та режимів роботи, фізико-механічних властивостей мінеральних добрив, зокрема, досліджували дальність розсівання, нерівномірність внесення добрив за шириною захвату тощо [1–8].

Щоб запобігти руйнуванню гранул мінеральних добрив, було вирішено, що лінійна швидкість лопаток у зоні надходження добрив на туковисівний робочий орган не повинна перевищувати $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ у разі внесення азотних видів добрив та $25 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ — у разі внесення фосфорних та калійних [9]. Інакше кажучи, кінематичні режими роботи туковисівного робочого органу обмежувалися. Водночас було встановлено, що максимальне значення кута між вектором абсолютної швидкості сходження добрив з туковисівного робочого органу з вертикальною віссю обертання та горизонтальним розташуванням розкидного диска, залежно від виду добрива, не повинно перевищувати $11,9\text{--}15,7^\circ$. Максимальне значення кута досягається за встановлення лопаток під кутом до плоского горизонтального диска не більш як $35\text{--}40^\circ$ [10]. Отже, подальше збільшення робочої ширини захвату за рахунок збільшення кута між лопаткою та горизонтальним диском стає неможливим.

Найвагомішими є результати дослідження, проведені з метою визначення швидкості

сходження добрива з диска робочого органу, оскільки від неї залежить дальність розкидання мінеральних добрив.

Так, у працях [11, 12] теоретично досліджено рух частинки добрива вздовж прямолінійної лопатки, закріпленої на верхній стороні плоского диска з вертикальною віссю обертання. У праці [11] розглянуто варіант радіального розташування лопатки, а також варіант її розташування під певним кутом до радіуса диска у напрямку обертання навколо осі. Досліджували також варіанти, коли лопатки встановлено під кутом до радіуса диска робочого органу як у напрямі його обертання, так і в протилежному напрямі [12]. В результаті було побудовано аналітичні вирази для визначення відносної швидкості руху добрива вздовж лопатки туковисівного робочого органу у будь-який момент часу. Ці дослідження отримали свій розвиток у праці [10]. Було складено систему узагальнених рівнянь для визначення часу руху частинки добрива вздовж лопатки та її відносної швидкості сходження з диска для загального випадку конструктивного виконання туковисівного робочого органу, в якого лопатка встановлена під кутом як до горизонтальної поверхні диска, так і до його радіуса.

Отже, наразі вже проведено теоретичні дослідження, в ході яких було отримано узагальнені рівняння для визначення часу руху частинки добрива вздовж лопатки та її відносної швидкості сходження з туковисівного робочого органу з вертикальною віссю обертання, у якого лопатки встановлені під кутом як до горизонтальної поверхні диска, так і до його радіуса у напрямку обертання диска або у протилежному.

Абсолютну швидкість сходження частинки добрива з диска туковисівного робочого органу для окремого та загального варіантів його конструктивного виконання визначали у праці [13]. Доведено, що дальність польоту частинок добрив, а отже, і ширина захвату машин для внесення мінеральних добрив, істотно залежать від кута між вектором абсолютної швидкості сходження частинок з диска та горизонтальною площиною. У відцентрових туковисівних робочих органах з вертикальною віссю обертання збільшення кута сходження добрива з диска

здійснюється лише за рахунок збільшення відносної швидкості руху частинок добрива вздовж лопаток. Водночас значну частину абсолютної швидкості сходження добрива з диска робочого органу становить переносна швидкість обертання диска. У зв'язку з цим розроблено нову конструкцію відцентрового туковисівного апарату, в якого вісь обертання розкидного диска нахилена під деяким кутом до горизонтальної площини, що забезпечує значне збільшення дальності розкидання добрива, а отже, і збільшення робочої ширини захвату та продуктивності машин. Комп'ютерному моделюванню, спрямованому на обґрунтування цієї гіпотези, якраз і присвячено цю роботу.

Мета досліджень — обґрунтувати роботу ширину захвату машини для внесення мінеральних добрив та її продуктивність залежно від конструктивних та кінематичних параметрів, а також від місця подачі частинок мінеральних добрив на поверхню розкидного диска, направлено під кутом до горизонту, скориставшись комп'ютерним аналізом руху частинки поверхню диска відцентрового розкидача.

Матеріали та методи досліджень. Для проведення досліджень застосовували методи вищої математики, теоретичної механіки, математичного моделювання, стандартні і спеціально розроблені комп'ютерні програми для числових розрахунків отриманих моделей, а також методи аналізу графічних залежностей між конструктивними і кінематичними параметрами.

Результати досліджень. Наведені в роботі [14] рівняння руху частинки мінерального добрива по диску вздовж лопатки нахиленого туковисівного робочого органу та її сходження з диска, отримані на підставі розв'язків диференціальних рівнянь руху частинки, становлять основу математичного забезпечення розробленої комп'ютерної моделі.

В нашому випадку диференціальне рівняння руху частинки добрива складене для сектора II диска нахиленого туковисівного робочого органу відповідно до схеми, поданої на рис. 1.

Після належних перетворень було отримано закон зміни швидкості відносного руху V_{BC} частинки добрива вздовж лопатки

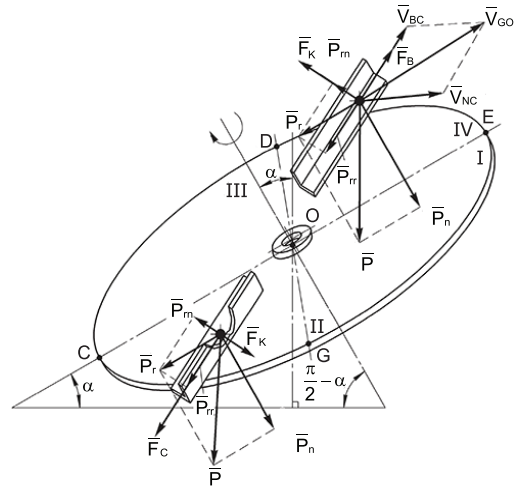


Рис. 1. Еквівалентна схема руху частинки добрива вздовж лопатки диска, нахиленого під кутом α до горизонтальної площини

в довільний момент часу t . Цей закон можна подати у такому вигляді:

$$V_{BC} = \frac{dL}{dt} = \left[-\frac{U \cos \gamma_0}{2\omega(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{U \lambda_2 \sin \gamma_0}{2\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{K \lambda_2}{\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \cdot \lambda_1 e^{\lambda_1 t} + \left[\frac{U \cos \gamma_0}{2\omega(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{U \lambda_1 \sin \gamma_0}{2\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{K \lambda_1}{\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \cdot \lambda_2 e^{\lambda_2 t} - \frac{U}{2\omega} \cos(\gamma_0 + \omega t). \quad (1)$$

Закон переміщення частинки добрива вздовж лопатки туковисівного робочого органу, диск якого нахилений під кутом α до горизонтальної площини, в довільний момент часу t можна подати у вигляді:

$$L = \left[-\frac{U \cos \gamma_0}{2\omega(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{U \lambda_2 \sin \gamma_0}{2\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{K \lambda_2}{\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \cdot e^{\lambda_1 t} + \left[\frac{U \cos \gamma_0}{2\omega(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{U \lambda_1 \sin \gamma_0}{2\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1)} - \frac{K \lambda_1}{\omega^2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \cdot e^{\lambda_2 t} - \frac{U}{2\omega^2} \cdot \sin(\gamma_0 + \omega t) - \frac{K}{\omega^2}. \quad (2)$$

Вирази (1) і (2) отримано на підставі розв'язання зазначених вище диференціальних рівнянь руху частинки добрива вздовж напрямної лопатки, що розташована на поверхні диска нахиленого робочого органу. Причому такі вхідні параметри, як α , r_0 , R та f_f , були нами визначені й увійшли в аналітичні вирази U і K та наведені в праці [14].

Абсолютну швидкість V_{GO} сходження частинки добрива з нахиленого робочого органу можна визначити з такого виразу:

$$V_{GO} = \sqrt{V_{BC}^2 + V_{NC}^2}, \quad (3)$$

де V_{BC} — відносна швидкість руху частинки добрива в момент її сходження з лопатки робочого органу, $m \cdot s^{-1}$; V_{NC} — переносна швидкість руху частинки добрива в момент її сходження з лопатки, $m \cdot s^{-1}$. Вирази (1)–(3) є основними аналітичними залежностями, що були використані під час проведення комп'ютерного аналізу.

З використанням отриманої моделі провели комплекс обчислювальних експериментів на ПК з метою дослідити перелічені далі кінематичні характеристики руху частинки добрива вздовж лопатки робочого органу, як-от:

- довжина пройденого частинкою добрива шляху $L(t)$ до моменту її сходження з диска;
- кут повороту ωt диска до моменту сходження частинки з нього;
- відносна швидкість V_{BC} руху частинки по лопатці;
- абсолютна швидкість V_{GO} сходження частинки добрива з диска.

Вихідними умовами для розрахунку слугували такі конструктивно-кінематичні параметри нахиленого робочого органу:

- кут нахилу диска до горизонтальної площини: $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$;
- кутова швидкість диска: $\omega = 30, 60, 90, 120 \text{ c}^{-1}$;
- відстань від місця подачі частинки добрива до осі обертання робочого органу (радіус r_0 подачі добрив): $r_0 = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 \text{ м}$;
- радіус диска туковисівного робочого органу: $R = 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 \text{ м}$;
- коефіцієнт зовнішнього тертя частинки мінеральних добрив по поверхні лопатки та диска: $f_f = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7$.

Спочатку було проведено комп'ютерний аналіз відносного руху частинки

мінеральних добрив по диску та лопатці нахиленого туковисівного робочого органу. Для цього було розроблено комп'ютерну програму, із застосуванням якої на підставі числових розрахунків на ПК можна отримати графічні залежності розгону частинки мінерального добрива від її фізико-механічних властивостей та параметрів і режимів роботи робочого органу.

Досліджуючи переміщення частинки мінерального добрива, що надійшла на лопатку робочого органу в секторі II ($k = 2$) за кута повороту лопатки $\gamma_0 = 15^\circ$, установили, що, рухаючись вздовж лопатки, при зміні кутової швидкості диска в межах $30\text{--}120 \text{ c}^{-1}$ відстань $0,3 \text{ м}$ частинки мінерального добрива долають за різний час (рис. 2). Це означає, що кутова швидкість істотно впливає на час розгону частинок мінеральних добрив нахиленого туковисівного органу. Причому цей час зменшується зі збільшенням кутової швидкості диска.

Як впливає з рис. 3, час розгону частинки добрива нахиленим туковисівним робочим органом змінюється залежно від її коефіцієнта зовнішнього тертя, причому зростання цього коефіцієнта призводить до збільшення часу розгону добрив.

Встановлено, що збільшення радіуса подачі добрива на лопатки нахиленого туковисівного робочого органу, тобто наближення зони живлення до периферійних кінців

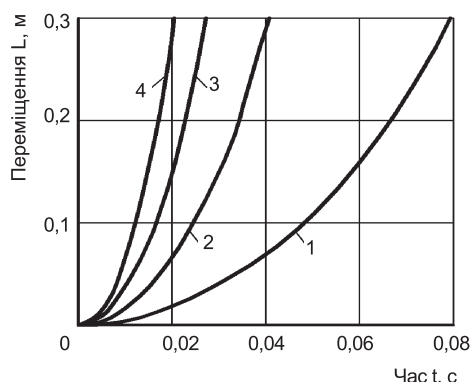


Рис. 2. Залежність переміщення L частинки добрива лопаткою нахиленого туковисівного робочого органу від часу t і кутової швидкості ω його диска за $f_f = 0,3$, $\alpha = 30^\circ$, $r_0 = 0,1 \text{ м}$
 $\omega = 30 \text{ c}^{-1}$ (1), 60 (2), 90 (3), 120 c^{-1} (4)

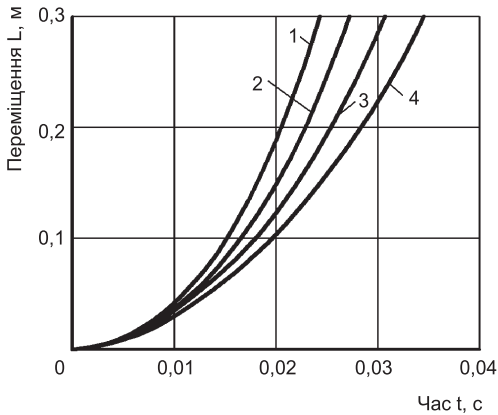


Рис. 3. Залежність переміщення L частинки добрива по лопатці нахиленого туковисівного робочого органу від часу t і коефіцієнта f_t її зовнішнього тертя за $\omega = 90 \text{ c}^{-1}$, $\alpha = 30^\circ$, $r_0 = 0,1 \text{ м}$, $f_t = 0,1$ (1), $0,3$ (2), $0,5$ (3), $0,7$ (4)

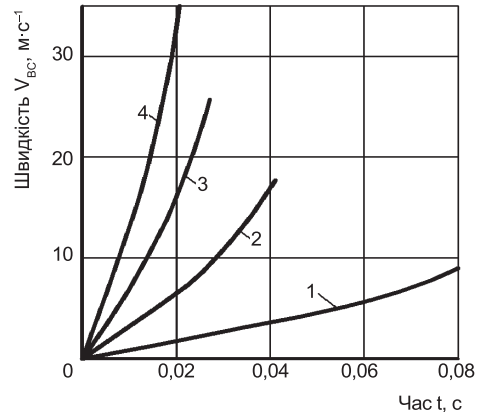


Рис. 4. Залежність відносної швидкості V_{BC} частинки добрива від часу t та кутової швидкості ω диска нахиленого туковисівного робочого органу за $f_t = 0,3$, $\alpha = 30^\circ$, $r_0 = 0,1 \text{ м}$, $\omega = 30 \text{ c}^{-1}$ (1), 60 (2), 90 (3), 120 c^{-1} (4)

лопаток, сприяє зменшенню часу розгону частинки добрива, а зміна кута α нахилу диска до горизонтальної площини не впливає на час руху t частинки до її сходження з лопатки. Таку закономірність можна пояснити тим, що на розгін частинки добрива більше впливає відцентрова сила інерції, ніж її сила ваги.

Далі було досліджено залежність відносної швидкості V_{BC} від зазначених вище параметрів, що в кінцевому підсумку впливає на значення абсолютної швидкості частинки в момент сходження з лопатки, а отже, і на дальність її польоту.

Графіки, наведені на рис. 4, підтверджують, що збільшення кутової швидкості обертання диска нахиленого туковисівного робочого органу викликає зростання відносної швидкості сходження частинки добрива з диска. За найбільшої кутової швидкості диска $\omega = 120 \text{ c}^{-1}$ найбільшою буде і відносна швидкість $V_{BC} = 35 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ сходження частинки, яке станеться через проміжок часу $t \approx 0,02 \text{ с}$.

Збільшення коефіцієнта зовнішнього тертя частинки добрива призводить до збільшення часу розгону по лопатці та зменшення відносної швидкості сходження частинки з лопатки (рис. 5). Зі збільшенням коефіцієнта зовнішнього тертя частинки від $f = 0,1$ до $f = 0,7$ її відносна швидкість сходження зменшиться з 32 до $18 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, а час

перебування на лопатці зросте від $t \approx 0,023 \text{ с}$ до $t \approx 0,034 \text{ с}$.

Істотний вплив на відносну швидкість сходження частинки добрива з лопатки нахиленого робочого органу має радіус її подачі r_0 . Розрахунки здійснювали за $r_0 = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 \text{ м}$. З'ясовано, що чим ближче до центра диска перебуває зона живлення робочого органу, тим частинка добрива має більшу відносну швидкість сходження

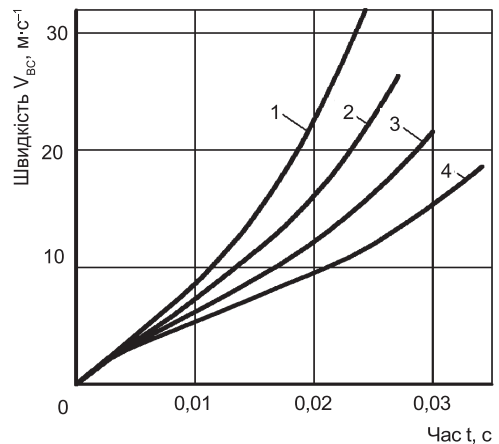


Рис. 5. Залежність відносної швидкості V_{BC} частинки добрива від часу t та коефіцієнта f_t її зовнішнього тертя за $\omega = 90 \text{ c}^{-1}$, $\alpha = 30^\circ$, $r_0 = 0,1 \text{ м}$, $f_t = 0,1$ (1), $0,3$ (2), $0,5$ (3), $0,7$ (4)

з лопатки. І навпаки: чим далі зона живлення міститься від центра диска, тим меншу відносну швидкість сходження з лопатки має частинка. Доведено, що кут нахилу α диска до горизонту, який у процесі дослідження мав значення 10° , 20° , 30° і 40° , не впливає на час розгону частинки добрива та відносну швидкість її сходження з лопатки робочого органу.

Крім того, було побудовано графіки залежності відносної швидкості частинки в момент її сходження з лопатки від конструктивних параметрів і режимів роботи, а також від фізико-механічних властивостей мінеральних добрив. Як бачимо (рис. 6), відносна швидкість руху частинки добрива в момент сходження з лопатки збільшується за зростання кутової швидкості диска і зменшується за зростання коефіцієнта зовнішнього тертя цієї частинки. Найменшому коефіцієнту тертя $f_f = 0,1$ та найбільшій кутовій швидкості обертального руху $\omega = 120 \text{ с}^{-1}$ відповідає найбільша відносна швидкість сходження частинки з лопатки, що становить $V_{BC} = 42 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Зростання кутової швидкості в межах $30\text{--}120 \text{ с}^{-1}$ забезпечує більший приріст відносної швидкості сходження частинки з лопатки, ніж зміна коефіцієнта зовнішнього тертя в межах $0,1\text{--}0,7$.

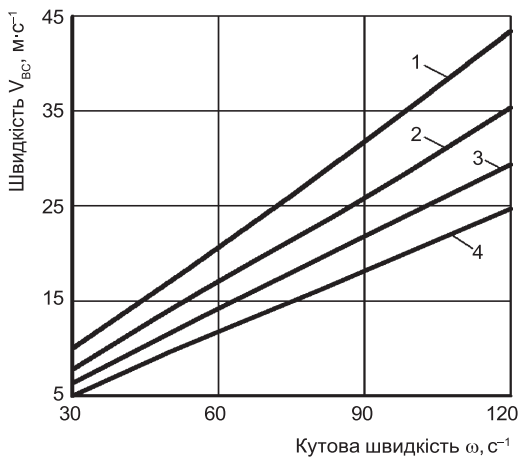


Рис. 6. Залежність відносної швидкості V_{BC} частинки добрива в момент її сходження з лопатки від кутової швидкості ω диска та коефіцієнта f_f зовнішнього тертя добрива за $\alpha = 30^\circ$ та $r_0 = 0,1 \text{ м}$
 $f_f = 0,1$ (1), $0,3$ (2), $0,5$ (3), $0,7$ (4)

Доведено, що збільшення радіуса початі частинки добрива (рис. 7) призводить до істотного зменшення її відносної швидкості сходження з лопатки нахилоного туковисівного робочого органу. Причому ця закономірність характерна для всіх досліджуваних значень коефіцієнта зовнішнього тертя добрива. Найінтенсивніше відносна швидкість сходження частинки з лопатки зменшується, коли радіус подачі частинки перевищує $0,5R$.

Отже, конструкція нахилоного туковисівного робочого органу повинна виключати випадки подачі добрива на лопатки за радіуса подачі, що перевищує $0,5R$.

Комп'ютерні розрахунки також засвідчили, що збільшення кутової швидкості ω обертального руху диска робочого органу в межах $30\text{--}120 \text{ с}^{-1}$ за всіх значень радіусів подачі частинки добрива, супроводжується збільшенням відносної швидкості сходження добрива з лопатки (рис. 8). Збільшення кута нахилу диска туковисівного робочого органу до горизонтальної площини не викликає зміни відносної швидкості сходження частинки добрива з лопатки за жодного із досліджуваних значень радіуса її подачі.

Розрахунки також засвідчили, що у разі використання будь-яких видів мінеральних добрив ($f_f = 0,1\text{--}0,7$) збільшення радіуса R

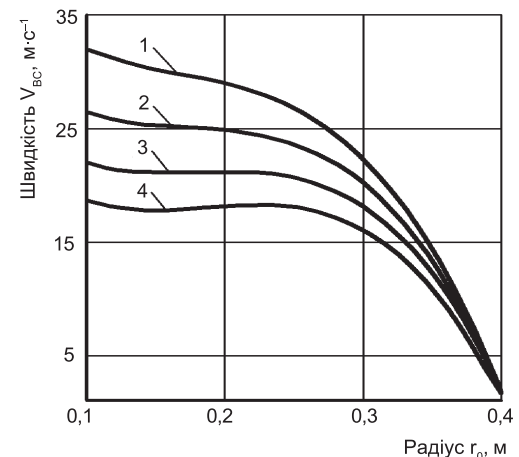


Рис. 7. Залежність відносної швидкості V_{BC} частинки добрива у момент її сходження з лопатки від радіуса r_0 подачі та коефіцієнта f_f зовнішнього тертя частинки за $\omega = 90 \text{ с}^{-1}$ та $\alpha = 30^\circ$
 $f_f = 0,1$ (1), $0,3$ (2), $0,5$ (3), $0,7$ (4)

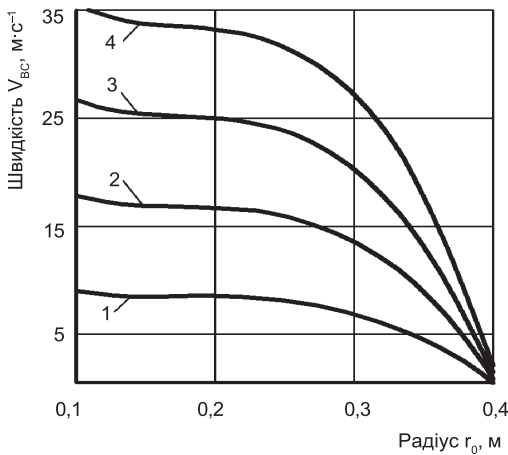


Рис. 8. Залежність відносної швидкості $V_{вс}$ частинки добрива в момент її сходження з лопатки нахиленого туковисівного робочого органу від радіуса r_0 подачі та кутової швидкості ω диска за $f_t = 0,3$ та $\alpha = 30^\circ$ $\omega = 30 \text{ c}^{-1}$ (1), 60 c^{-1} (2), 90 c^{-1} (3), 120 c^{-1} (4)

диска робочого органу сприяє зростанню відносної швидкості сходження частинки добрива з лопатки. Проте можливість збільшення радіуса диска обмежується конструкцією машини. Адаже у разі істотного збільшення радіуса R , коли йдеться про машину з двома туковисівними робочими органами, виникає необхідність обладнання цієї машини ще двома додатковими горизонтальними конвеєрами, на зовнішніх кінцях яких встановлюють туковисівні робочі органи.

Далі було проведено комп'ютерний аналіз абсолютного руху частинки мінерального добрива по нахиленому робочому органу. Величина абсолютної швидкості сходження частинки добрива з лопатки залежить не тільки від її відносної швидкості руху поверхню лопатки, а й від переносної швидкості, що визначається кутовою швидкістю обертання диска. Оскільки кутова швидкість обертання диска є сталою, то спостерігається однаковий характер зміни відносної $V_{вс}$ (рис. 5) та абсолютної $V_{го}$ швидкості сходження частинки добрива з лопатки робочого органу залежно від кутової швидкості ω його диска.

Як показують комп'ютерні розрахунки, збільшення кутової швидкості ω диска нахиленого туковисівного робочого органу зумовлює зростання абсолютної швидкості

$V_{го}$ частинки добрива в момент її сходження з лопатки у разі використання будь-яких видів мінеральних добрив ($f_t = 0,1 - 0,7$). При цьому найменшому коефіцієнту тертя $f_t = 0,1$ та найбільшій кутовій швидкості $\omega = 120 \text{ c}^{-1}$ відповідає максимальна абсолютна швидкість сходження частинки з лопатки — вона становить $65 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$.

Вплив коефіцієнта f_t зовнішнього тертя частинки мінерального добрива та радіуса її подачі r_0 на абсолютну швидкість $V_{го}$ близький до їх впливу на відносну швидкість $V_{вс}$. Абсолютна швидкість сходження частинки з лопатки нахиленого туковисівного робочого органу найінтенсивніше зменшується за значень радіуса її подачі, більших від $0,5R$, що спостерігалось і під час дослідження відносної швидкості. Причому більшому значенню кутової швидкості ω відповідає більше значення абсолютної швидкості $V_{го}$ частинки добрива в момент її сходження з лопатки робочого органу за всіх досліджуваних значень радіуса подачі частинки.

Згідно з комп'ютерними розрахунками зміна кута α нахилу диска туковисівного робочого органу до горизонтальної площини від 0 до 40° практично не впливає на значення абсолютної швидкості $V_{го}$ сходження частинки добрива з диска за будь-якого значення радіуса r_0 подачі добрив. Однак при цьому, що дуже важливо, збільшується кут між вектором абсолютної швидкості $V_{го}$ частинки добрива в момент її сходження з лопатки і горизонтальною площиною. Збільшення зазначеного кута істотно впливає на дальність польоту частинок добрива, а отже, і на ширину захвату машини.

Загалом, абсолютна швидкість $V_{го}$ частинки добрива в момент її сходження з лопатки робочого органу прямо пропорційно залежить від його радіуса R за всіх досліджуваних значень коефіцієнта зовнішнього тертя цієї частинки. Однак зазначений параметр має конструктивні обмеження, які необхідно враховувати, працюючи над створенням нових машин для внесення мінеральних добрив.

Побудовані із використанням результатів комп'ютерного аналізу абсолютні траєкторії руху частинки добрива поверхню лопатки дають змогу глибше зрозуміти вплив конструктивних параметрів та режимів

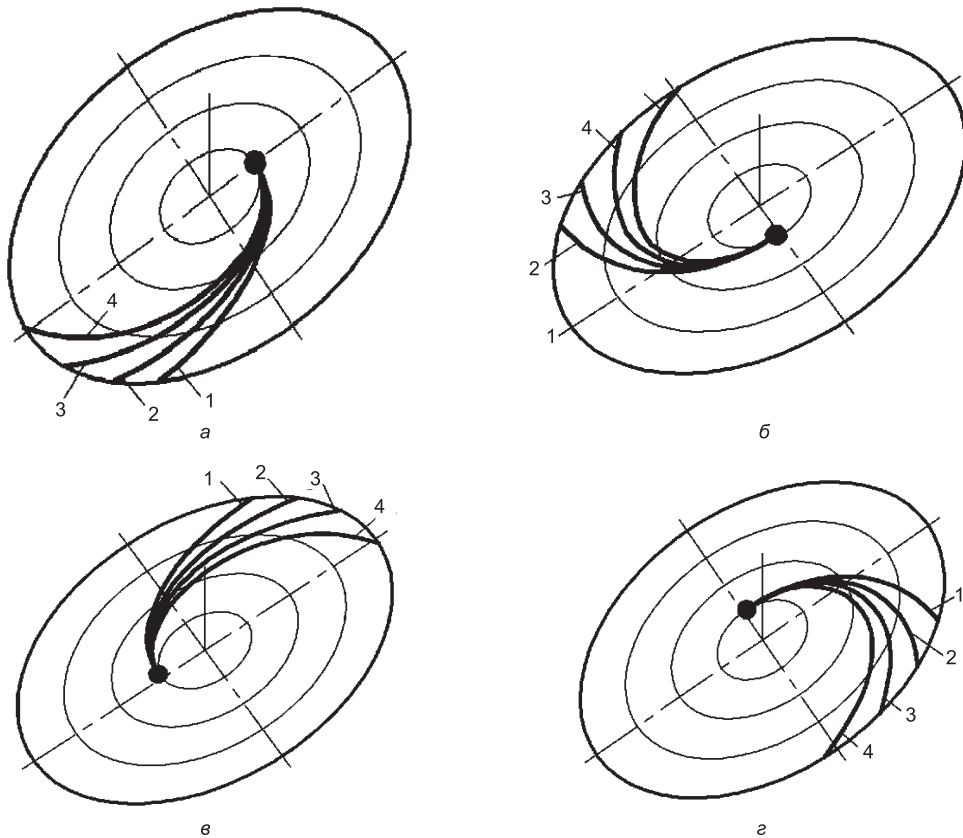


Рис. 9. Абсолютні траєкторії руху частинки добрива по лопатці нахиленого туковисівного робочого органу до її сходження з лопатки залежно від номера k сектора подачі та коефіцієнта f , зовнішнього тертя частинки добрива за $\alpha = 30^\circ$, $r_0 = 0,1$ м, $\omega = 90$ с $^{-1}$ та $\gamma = 15^\circ$. Сектор k подачі частинки добрива – I (а), II (б), III (в), IV (г). $f_r = 0,1$ (1), $0,3$ (2), $0,5$ (3), $0,7$ (4)

роботи нахиленого туковисівного робочого органу на абсолютний рух частинок добрива (рис. 9).

З наведених на рис. 9 графіків видно, що чим більший коефіцієнт f_r зовнішнього тертя частинки, тим більший час її розгону, а з лопатки частинка зійде після повороту диска туковисівного робочого органу на кут, близький до 180° . Це означає, що за таких вихідних умов потрібно унеможливити варіант подачі частинок у секторі I, тому що всі їхні траєкторії будуть спрямовані вниз, а отже, їх дальність польоту стане мінімальною. Сходження добрива з лопаток нахиленого робочого органу в потрібному для розсівання напрямку забезпечується під час його подачі в межах сектора II диска, коли частинки будуть спрямовані

вгору і дальність їх польоту стане максимальною.

Слід зазначити, що напрям сходження частинки з лопатки робочого органу істотно залежить і від радіуса її подачі. Тому також розраховували траєкторії руху частинки, поданої на лопатку робочого органу в межах сектора II за різних значень радіуса r_0 . З'ясовано, що частинка, подана на диск з відстані $r_0 = 0,2-0,4$ м від осі його обертання, також спрямована вниз у момент сходження з лопатки, що є неприйнятним; лише за $r_0 = 0,1$ м вона спрямована вгору, і це забезпечує бажану дальність її польоту.

Один зі способів рівномірного розподілу частинок добрива по диску для забезпечення їх рівномірного сходження полягає

в наданні йому вимушених коливань [15]. Якісні показники виконання технологічного процесу залежно від коливань робочого органу свого часу були проаналізовані в працях [16, 17].

Насамкінець було встановлено, що абсолютні траєкторії руху частинки до її сходження з нахиленого туковисівного робочого органу практично не залежать від його кутової швидкості ω , тобто частинки мають однаковий кут розгону. До того ж на значення кута розгону мінеральних добрив нахиленим туковисівним робочим органом

практично не впливає номер сектора диска, в якому відбувається його живлення, у разі зміни кутової швидкості диска від 30 до 120 с^{-1} та радіуса подачі добрив на диск від 0,1 до 0,4 м. Отже, в обладнаних такими робочими органами машинах під час регулювання частоти обертання диска немає потреби коригувати місцезнаходження зони живлення туковисівного робочого органу, а у разі переходу на внесення добрива з іншим коефіцієнтом зовнішнього тертя місцезнаходження зони живлення необхідно коригувати.

Висновки

Відносна швидкість сходження частинки мінерального добрива з лопатки нахиленого туковисівного робочого органу не залежить від номера сектора, в якому здійснюється його живлення, і збільшується в результаті зростання кутової швидкості диска та зменшення радіуса подачі і коефіцієнта зовнішнього тертя добрива.

Найбільший вплив на відносну швидкість сходження частинки добрива з лопатки мають кута вихода швидкості диска і радіус подачі. За коефіцієнта зовнішнього тертя добрива 0,3, радіуса подачі 0,1 м, кута нахилу диска до горизонтальної площини 30° і кутової швидкості диска 30, 60, 90 та 120 с^{-1} відносна швидкість сходження частинки добрива з лопатки відповідно становить 9,0, 17,5, 26,5 та 35,0 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$. За кутової швидкості диска 90 с^{-1} і зазначених параметрів робочого органу та радіуса подачі добрива 0,1; 0,2 і 0,3 м відносна

швидкість сходження частинки добрива з лопатки становить 26,5, 25,0 і 20,0 $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$. Значення радіуса подачі добрива не повинно перевищувати половини радіуса диска туковисівного робочого органу.

Зміна кута нахилу диска робочого органу до горизонтальної площини в межах 0–40° не впливає на час розгону частинки добрива та значення відносної й абсолютної швидкостей їх сходження з лопатки. Однак вона спричиняє, що дуже важливо, зміну кута між вектором абсолютної швидкості сходження частинки добрива з робочого органу та горизонтальною площиною. А це сприяє збільшенню дальності польоту частинки.

Подачу добрива на робочий орган доцільно здійснювати у секторі II його диска.

Раціональні значення кута нахилу диска туковисівного робочого органу до горизонтальної площини перебувають у діапазоні 20–30°.

Bulgakov V.¹, Adamchuk O.², Holovach I.³, Nadykto V.⁴, Trokhaniak O.⁵

^{1, 3, 5}National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine; ²State Service of Ukraine on Food Safety and consumer protection, 1 B. Hrinchenko Str., Kyiv, 01001, Ukraine; ⁴Dmytro Motornyj Tavria State Agrotechnological University, 18 B. Khmelnytskyi Ave., Melitopol, Zaporizhzhia Region, 72312, Ukraine; e-mail: ¹vbulgakov@meta.ua, ²adamchuk-o-v@ukr.net; ³holovach.iv@gmail.com, ⁴volodymyr.nadykto@tsatu.edu.ua, ⁵klendij_o@ukr.net; ORCID: ¹0000-0003-3445-3721, ²0000-0003-2767-004X, ³0000-0003-1387-4789, ⁴0000-0002-1770-8297, ⁵0000-0002-4671-5824

Simulation of the movement of mineral fertilizer particles on the central working body, inclined at an angle to the horizon

Goal. Justification of the working width of the machine for applying mineral fertilizers and its productivity depending on the structural and kinematic parameters, as well as the place of supply of the particles of mineral fertilizers to the surface of the spreading disk, inclined at an angle to the horizon, based on the computer analysis of the movement of the particles on the surface of centrifugal spreader. **Methods.** The research results presented in this work were obtained with the help of modeling methods, higher mathematics, theoretical mechanics, standard and developed computer

programs for numerical calculations of the obtained mathematical models, and even methods of analysis of the obtained graphic dependencies between structural and kinematic parameters. **Results.** Surface application of mineral fertilizers is the most common and effective way of increasing soil fertility and obtaining high yields of agricultural crops. We have developed a new design of a centrifugal fat seeding device, which has a spreading disc, the axis of which is inclined to the horizontal plane, which allows to significantly increase the flight range of mineral fertilizer particles after they leave the disc blades. However, the design features of the inclined spreading disk require a careful justification of the parameters of the disk itself and the conditions for supplying it with mineral fertilizers from the feeder and the hopper. Such studies can be carried out with the help of computer modeling of the release of a particle of mineral fertilizer from the blade of a spreading disk, changing the structural and kinematic parameters of this process. **Conclusions.** On the basis of the mathematical model of the scattering of mineral fertilizer particles built by the authors and the obtained differential equations of motion of a particle of mineral fertilizer along the disc along the blade of a centrifugal fat-suspending working body inclined at an angle to the horizontal plane and the equations of the absolute motion of the particle and its descent. This made it possible to change the parameters of the supply

of mineral fertilizer particles to the surface of the spreading disc, to make a computer analysis of the acceleration of the specified particle from the center of the disc to its periphery, as well as the movement of the particle after leaving the disc of the centrifugal spreading working body. New graphical dependences of the movement and speed of a particle of mineral fertilizer on time, constructive and kinematic parameters of the working body, as well as the coefficient of friction of the particle on the surface of the disc were constructed. The angular speed of the spreading disk, its radius, the angle of inclination of the disk to the horizon, and the initial radius of the supply of a particle of mineral fertilizer to the disk are taken as kinematic and design parameters of the centrifugal working body. We also obtained graphs of the dependence of the absolute speed of the fertilizer particle ascent from the disk of the working body on time and the above-mentioned parameters, which depends on the flight range of the fertilizer particle after leaving the blade of the disk of the centrifugal working body. This made it possible to obtain the working width of the machine for applying mineral fertilizers and its productivity as a final result.

Key words: fertilizers, scattering, particle, differential equation, parameters, solutions on PC, graphical dependencies, absolute trajectory of movement, computer analysis.

DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202307-05>

Бібліографія

1. Адамчук В.В. Дослідження руху частки технологічного матеріалу в повітряному середовищі в умовах вітру та супроводжуючого повітряного струменя. Механізація та електрифікація сільського господарства: міжвідомч. тематичн. наук. зб. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2005. Вип. 89. С. 27–49.
2. Адамчук В.В., Моїсєєнко В.К. Машини для розсіювання мінеральних добрив МРД-4. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки та технологій для сільського господарства України: зб. наук. пр. УкрНДІПЗД ім. Леоніда Погорілого. Дослідницьке, 2005. Вип. 8 (22): у 2-х кн. Кн. 2. С. 209–219.
3. Адамчук В.В. Обґрунтування методики визначення параметрів відцентрового розсіювального органу. *Вісник аграрної науки*. 2005. № 2. С. 45–48.
4. Адамчук В.В. Теорія відцентрових робочих органів машин для внесення мінеральних добрив. Київ: Аграрна наука, 2010. 185 с.
5. Вожик Ю.Г., Адамчук В.В. Вплив гранулометричного складу аміачної селітри на рівномірність її механізованого внесення. *Хімія у сільському господарстві*. 1982. № 1. С. 16–18.
6. Дядя В.М. Обґрунтування параметрів відцентрового робочого органу з активними лопатями машин для внесення мінеральних добрив: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мелітополь: Таврійська ГАТА, 2003. 19 с.
7. Adamchuk V., Bulgakov V., Beloev Hr., Korenko M. Mineral fertilisation theory and working tools of fertiliser spreading machines. Sofia: Prof. Marin Drinov Publishing House of Bulgarian Academy of Sciences, 2017. 165 p.
8. Кійслер М.А. Дослідження кінчного пристрою, що розкидає, для внесення мінеральних добрив: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Каунас, Литовська сільськогосподарська академія, 1971.
9. Адамчук В.В., Моїсєєнко В.К. Руйнування гранул мінеральних добрив відцентровим розсіювальним органом. *Вісник аграрної науки*. 2003. № 5. С. 53–57.
10. Адамчук В.В. Механіко-технологічні та технічні засади підвищення ефективності внесення твердих мінеральних добрив та хіміеліорантів: автореф. дис. ... докт. техн. наук. Київ: Національний аграрний університет, 2006. 40 с.

11. *Василенко П.М.* Кінематичні основи конструкції відцентрового апарату тукової сівалки. Сільськогосподарська машина. 1934. № 10. С. 7–10.

12. *Василенко П.М.* Теорія руху частки по шорстких поверхнях сільськогосподарських машин. Київ: УАСГН, 1960. 283 с.

13. *Bulgakov V., Ivanovs S., Adamchuk O., Nowak Ja.* Research of descent of mineral fertiliser particle from disc inclined at angle to horizon. Proceedings 19th International Scientific Conference «Engineering for rural development», May 20–22, 2020. Jelgava, Latvia, 2020. V. 19. P. 390–398.

14. *Булгаков В.М., Адамчук О.В.* Теоретичне дослідження відцентрового розкидача мінераль-

них добрив. *Вісник аграрної науки.* 2016. № 12. С. 51–57.

15. *Bulgakov V., Sevostianov I., Kaletnik G. et al.* Theoretical Studies of Vibration Process of Dryer for Waste of Food. *Rural Sustainability Research.* 2020. N 44 (339). P. 32–45.

16. *Bulgakov V., Adamchuk V., Ivanovs S., Ihnatiev Y.* Theoretical investigation of aggregation top removal machine frontally mounted on wheeled tractor. *Engineering for Rural Development.* 2017. N 16. P. 273–280.

17. *Bulgakov V., Adamchuk V., Nozdrovický L., Ihnatiev Y.* Theory of Vibrations of Sugar Beet Leaf Harvester Front-Mounted на Universal Tractor. *Acta Technologica Agriculturae.* 2017. N 20 (4). P. 96–103.