

УДК 631.31: 624.131

## ФРИКЦІЙНА ВЗАЄМОДІЯ ҐРУНТУ З ПОВЕРХНЕЮ РОБОЧИХ ОРґАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

К. В. Борак

Житомирський агротехнічний коледж, Україна.

*Стаття з спеціальності: 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва.*

*Кореспонденція автора: koss1983@meta.ua.*

*Історія статті: отримано – серпень 2019, акцептовано – листопад 2019.*

*Бібл. 8, рис. 3, табл. 0.*

**Анотація.** Проектування робочих органів сільськогосподарських машин повинно ґрунтуватися на фізичні, хімічні та механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів з якими вони взаємодіють під час експлуатації. Однією з основною характеристикою дисперсних сільськогосподарських матеріалів є коефіцієнт тертя між ним та поверхнею робочого органу. Найбільш складним для дослідження, серед сільськогосподарських матеріалів, є ґрунт. Складність його дослідження пов'язано зі складною будовою, адже ґрунт є гетерогенною системою, що містить тверду, рідку та газоподібну фази, а також живі організми. Крім того співвідношення між фазами може змінюватися в часі.

Дослідженням фрикційної взаємодії двох твердих тіл якісно розкрито в сучасній літературі. В той же час питання взаємодії твердого тіла з дисперсним середовищем, а особливо з реальною ґрунтовою масою залишається нерозкритим.

В роботі встановлено, що при експлуатації ґрунтообробних машин, в зоні контакту робочого органу і ґрунту, одночасно відбуваються всі три види тертя (тертя ковзання, тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням). Для визначенні загального коефіцієнта тертя між поверхнею робочого органу ґрунтообробних машин і ґрунтом з урахуванням всіх можливих видів тертя складена відповідна залежність. Розроблена система рівнянь Колмогорова, яка дає змогу знаходити всі ймовірності значення коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом як функції часу.

**Ключові слова:** коефіцієнт тертя, робочий орган, ґрунт, ковзання, кочення, ґрунтообробна машина.

### Постановка проблеми

Технологічні процеси, які виконують сільськогосподарські машини повинні проектуватися ґрунтуючись на фізичні, хімічні та механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. Найбільш складним для дослідження, серед сільськогосподарських матеріалів, є ґрунт. Складність

його дослідження пов'язано зі складною будовою, адже ґрунт є гетерогенною системою, що містить тверду рідку та газоподібну фази, а також живі організми. Крім того співвідношення між фазами може змінюватися в часі. Одною з основних фізичних характеристик ґрунту при проектуванні ґрунтообробних машин, є коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні робочого органу. На даний час, при проектуванні сільськогосподарських машин, коефіцієнт тертя між робочою поверхнею ґрунтообробних машин і ґрунтом розглядається тільки на макрорівні. За коефіцієнт тертя між робочою поверхнею ґрунтообробних машин і ґрунтом приймають коефіцієнт ковзання і враховують тільки механічну складову (закон Амонтова-Кулона). Насправді процес тертя між ґрунтом і поверхнею робочого органу набагато складніший і не може описуватися тільки коефіцієнтом тертя ковзання з механічної точки зору. Саме тому необхідно теоретично визначити коефіцієнт тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом з урахуванням можливості протікання всіх видів зовнішнього тертя (кочення, ковзання, кочення з проковзуванням) у фрикційному контакті та молекулярну складову процесу тертя.

### Аналіз останніх досліджень

Властивості фрикційного контакту суттєво впливають на процеси тертя та зношування, оскільки внаслідок дискретності контакту торкання виступів відбувається тільки на окремих ділянках, які утворюють фактичну зону контакту. Дослідженням фрикційної взаємодії двох твердих тіл в свій час займалися Боуден Ф. П., Тейбор Д., Демкін Д. М., Баклі Д., Бєлий А. В., Крагельський І. В., Горячева І. Г. та інші, саме тому дане питання якісно розкрито в сучасній літературі. В той же час питання взаємодії твердого тіла з дисперсним середовищем, а особливо з реальною ґрунтовою масою залишається нерозкритим.

Коефіцієнт тертя є важливою характеристикою фрикційного контакту двох тіл. В класичних та більшості сучасних роботах [1, 2, 3, 4] коефіцієнт тертя

між ґрунтом і поверхнею робочих органів розглядається тільки з механічної точки зору. Такий однобокий погляд не дозволяє об'єктивно описувати процеси, що протікають на поверхні тертя. Врахування всіх факторів при визначенні коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних наддасть можливість більш якісно проводити проектування сільськогосподарських машин.

При розгляді фрикційної взаємодії двох тіл необхідно спочатку розглянути фрикційні властивості елементів трибосистеми. В нашому випадку це ґрунт та поверхня робочого органу ґрунтообробних машин. Особливістю цієї трибосистеми є те, що для робочого органу ми розглядаємо тільки поверхню, а для ґрунту весь об'єм, оскільки в процесі функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» відбувається постійне перемішування ґрунту і взаємодія з поверхнею робочого органу можуть об'єми ґрунту, які при на початку функціонування трибосистеми знаходились на певній відстані від поверхні робочого органу.

Фрикційні властивості ґрунту виявляються в дії сили опору ковзанню тіла (робочого органу, опорної поверхні тощо) відносно поверхні ґрунту – сили зовнішнього тертя та в дії сили опору ковзанню однієї частини ґрунту відносно іншої – сили внутрішнього тертя. В класичних роботах для визначення сили зовнішнього тертя ґрунту запропоновано використовувати формулу Амонтона-Кулона:

$$F_T = fN = Ntg\varphi \quad (1)$$

Як відомо дана залежність не враховує молекулярну складову процесу тертя, яку обов'язково необхідно враховувати при проектуванні робочих органів ґрунтообробних машин, оскільки молекулярна складова займає значне місце при терті ґрунтової маси і робочої поверхні ґрунтообробних машин [5, 6].

Саме тому математичне моделювання процесів, що відбуваються при фрикційному контакті твердого тіла і ґрунту, з урахуванням всіх явищ і процесів у зоні контакту, представляє інтерес для сільськогосподарського машинобудування.

### Мета досліджень

Мета даної роботи полягає у теоретичному визначенні коефіцієнта тертя між ґрунтом та поверхнею робочого органу ґрунтообробних машин.

### Результати досліджень

Коефіцієнт тертя між поверхнею робочого органу та ґрунтом складається не тільки з коефіцієнта тертя ковзання, а також із тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням. Ймовірність виникнення того чи іншого виду тертя залежить від ступеня закріпленості абразивних частинок в ґрунті.

При експлуатації ґрунтообробних машин, в зоні контакту робочого органу і ґрунту, одночасно відбуваються всі три види тертя (тертя ковзання, тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням) тому загальний коефіцієнт тертя між поверхнею робочого

органу ґрунтообробних машин і ґрунтом можна записати виразом:

$$f_{\text{заг}} = k_1 f_{\text{ковз}} + k_2 \left( \frac{f_{\text{коч1}}/M_{R1}}{\dots + \frac{f_{\text{кочn}}/M_{Rn}}{}} \right) + k_3 f_{\text{коч. з прок.}} \quad (2)$$

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1 \quad (3)$$

де  $f_{\text{заг}}$  – загальний коефіцієнт тертя між поверхнею робочого органу та ґрунтом;  $f_{\text{ковз}}$  – коефіцієнт тертя ковзання між поверхнею робочого органу та ґрунтом;  $f_{\text{коч1}}, f_{\text{коч2}}, f_{\text{кочn}}$  – коефіцієнт тертя кочення між поверхнею робочого органу та частинками ґрунту;  $f_{\text{коч. з прок.}}$  – коефіцієнт тертя кочення між поверхнею робочого органу та ґрунтом;  $k_1, k_2, k_3$  – коефіцієнти, що враховують частку, яка припадає на один із видів тертя відповідно;  $M_{R1}, M_{R2}, M_{Rn}$  – математичне очікування радіусу частинок ґрунту, які взаємодіють з поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин.

Як бачимо з формули процес тертя між ґрунтом та поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин набагато складніший ніж при фрикційній взаємодії двох твердих тіл. В свою чергу це пов'язано зі складною будовою ґрунтового середовища.

Негативні явища абразивного зношування (процес мікрорізання) будемо спостерігати при  $k_1 = 1$ . При  $k_1 = 1$  абразив жорстко закріплений і не відбувається процес переміщення абразивних частинок по всьому об'єму абразивної маси. При взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин з ґрунтом в процесі їх експлуатації  $k_1$  не може дорівнювати 1.

При  $k_2 = 1$  відбувається найменш інтенсивний процес абразивного зношування (полідеформаційне деформування). Процес зношування при  $k_2 = 1$  носить втомлювальний характер. Для того щоб  $k_2 = 1$  в абразивній масі не повинно бути вологи, абразивні частинки повинні мати ідеально круглу форму та між ними не повинно бути речовин, які можуть їх з'єднати. Дана абразивна маса є ідеальною та в реальних умовах експлуатації деталей машин не зустрічається. Крім того слід відмітити, що навіть при ідеальній абразивній масі неможливо досягнути тертя кочення без проковзування, оскільки частинки абразивної маси і поверхня робочого органу зазнають пружних деформацій (частинки ґрунту стискаються, а метал робочого органу – розтягується). Саме тому  $k_2 \rightarrow 0$ .

В зв'язку з неоднорідністю ґрунтового середовища та у відповідності до молекулярно-механічної теорії коефіцієнт тертя ковзання між поверхнею робочого органу та ґрунтом дорівнює:

$$f_{\text{ковз}} = \frac{\beta_1 a_1 S_{\phi 1} + \beta_2 a_2 S_{\phi 2} + \dots + \beta_n a_n S_{\phi n}}{P} + (b_1 + b_2 + \dots + b_n) \quad (4)$$

де  $a_1, a_2 \dots a_n$  – середня інтенсивність молекулярної складової частинок ґрунту;  $S_{\phi 1}, S_{\phi 2} \dots S_{\phi n}$  – площа фактичного контакту поверхні робочого органу з складовими частинками ґрунту;  $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$  – коефіцієнти, що враховують частку, яка припадає на кожну частинку ґрунту;  $P$  – сила тиску на поверхню робочого органу в результаті взаємодії з ґрунтом;  $b_1, b_2 \dots b_3$  – коефіцієнт, який характеризує механічну складову сили тертя між поверхнею робочого органу

ґрунтообробних машин і складовими частинками ґрунту.

На відміну від коефіцієнта тертя ковзання, який є безрозмірною величиною, коефіцієнт тертя кочення  $f_{\text{коч}}$  має розмірність довжини (м). Величина  $f_{\text{коч}}$  залежить від матеріалу тіл і визначається тільки дослідним шляхом. Для порівняння коефіцієнта тертя кочення і ковзання використовують показник  $f_{\text{коч}}/R$ .

На основі теорії проковзування та адгезійної теорії коефіцієнт тертя кочення з проковзування між поверхнею робочого органу і ґрунтом складає:

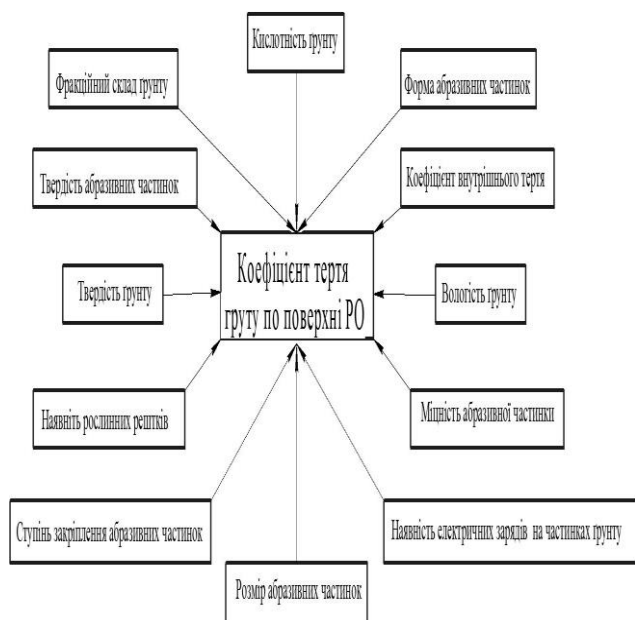
$$f_{\text{коч. з прок.}} = \psi_1 \left( \frac{f_{\text{коч1}}}{M_{R1}} + \frac{f_{\text{коч2}}}{M_{R2}} + \dots + \frac{f_{\text{кочn}}}{M_{Rn}} \right) + \psi_2 (f_{\text{прок1}} + f_{\text{прок2}} + \dots + f_{\text{прокn}}) + \psi_3 \left( \frac{\beta_1 a_1 S_{\phi 1} + \beta_2 a_2 S_{\phi 2} + \dots + \beta_n a_n S_{\phi n}}{P} \right) =$$

$$\psi_1 \left( \frac{f_{\text{коч1}}}{M_{R1}} + \frac{f_{\text{коч2}}}{M_{R2}} + \dots + \frac{f_{\text{кочn}}}{M_{Rn}} \right) + \psi_2 \left( \left( \frac{12F_1}{N} \left( \frac{M_{R1}}{M_{b1}} \right)^2 \right) + \left( \frac{12F_2}{N} \left( \frac{M_{R2}}{M_{b2}} \right)^2 \right) + \dots + \left( \frac{12F_n}{N} \left( \frac{M_{Rn}}{M_{bn}} \right)^2 \right) \right) +$$

$$\psi_3 \left( \frac{\beta_1 a_1 S_{\phi 1} + \beta_2 a_2 S_{\phi 2} + \dots + \beta_n a_n S_{\phi n}}{P} \right) \quad (5)$$

де  $\psi_1$  – коефіцієнт який враховує тертя кочення без проковзування,  $\psi_2$  – коефіцієнт який враховує тертя обумовлене проковзуванням;  $\psi_3$  – коефіцієнт врахування адгезійної складової тертя кочення;  $F_1, F_2, F_3$  – сила тертя, яка обумовлена проковзуванням елементів ґрунтового середовища;  $N$  – нормальне навантаження;  $M_{b1}, M_{b2}, M_{bn}$  – математичне очікування напівширини контактної площадки, елементів ґрунту;  $N$  – нормальне навантаження.

На величину коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом впливають характеристики ґрунтового середовища [6, 7, 8], які представлені на рис 1.



**Рис. 1.** Характеристики ґрунтового середовища, які впливають на величину коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом.

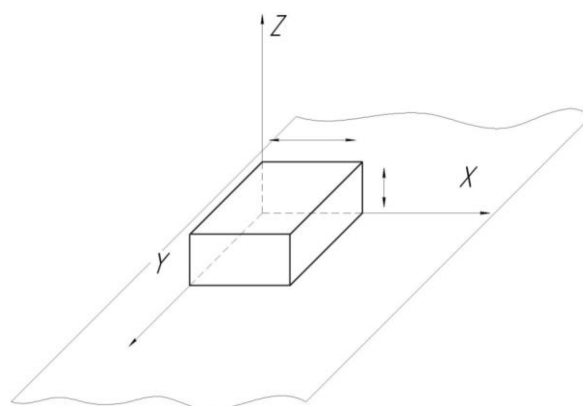
**Fig. 1.** Characteristics of the soil environment that affect the magnitude of the friction coefficient between the surface of the working bodies of the tillage machines and the soil.

На коефіцієнт тертя також впливає і механічні властивості поверхні робочого органу ґрунтообробних машин (шорсткість, напрямок шорсткості, вид термічної обробки).

Також на величину коефіцієнта тертя суттєво впливає наявність вібрацій. В процесі вібрації змінюються характеристики ґрунтового середовища, які впливають на величину коефіцієнта тертя. В більшості відомих роботах відзначається, що в результаті вібрацій можлива зміна не тільки реологічних характеристик, а і властивостей тіла. Дана зміна викликає зменшення величини коефіцієнта тертя. Ефективний коефіцієнт тертя при вібрації в двох площинах (рис. 2), можливо визначити залежністю:

$$f_{\text{еф}} = f_0 \left( 1 - \frac{mw^2 A_z}{N} - \frac{mw^2 A_x}{N} \right) \quad (6)$$

де  $f_0$  – коефіцієнт тертя спокою;  $m$  – маса;  $w$  – частота вібрації;  $A$  – амплітуда вібрації;  $N$  – нормальна реакція опори.



**Рис. 2.** Схема дії вібрації.  
**Fig. 2.** Scheme of vibration.

Відмінність коефіцієнта тертя спокою від коефіцієнта тертя ковзання обумовлено виникненням вібрації при відносному переміщенні двох тіл.

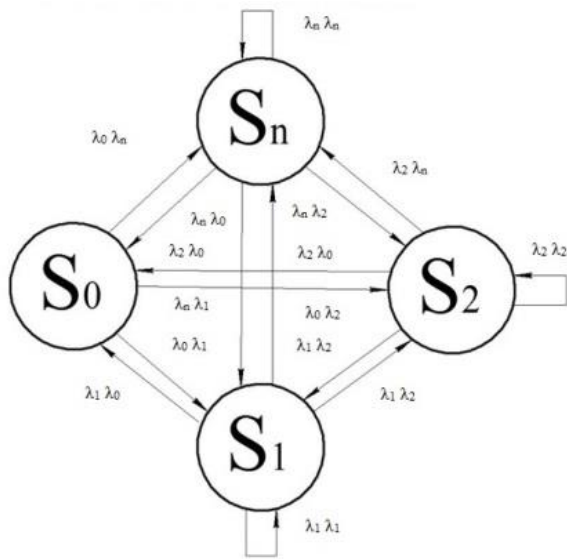
В випадку коли вібрації виникають на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин і передаються ґрунтовому середовищу, можуть змінюватись характеристики, які суттєво впливають на величину коефіцієнта тертя ґрунту по сталі. Так, зі зміною ступеня закріплення абразивних частинок (внаслідок вібрації), можлива зміна виду тертя на поверхні робочого органу з тертя ковзання на тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням, що в свою чергу призведе до зменшення коефіцієнта тертя.

Враховуючи вище перераховане коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні робочих органів ґрунтообробних машин можна вважати, як випадкову функцію, яка змінюється в процесі функціонування трибоситеми «робочий орган – ґрунт». Звичайно не можливо точно передбачити яким буде коефіцієнт тертя, оскільки він залежить від багатьох факторів (характеристик ґрунтового середовища (рис. 1) і поверхні робочого органу), спільну дію яких можна записати як елементарну подію.

Оскільки в процесі взаємодії робочого органу з ґрунтом коефіцієнт тертя змінюється в межах від 0 до 1 (тобто при 0 коефіцієнт тертя буде дорівнювати  $f_{\text{заг}} = \min$ , а при 1  $f_{\text{заг}} = \max$ ). Це теоретичне

твердження, оскільки при експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин, реальні значення коливаються в межах 0,2...0,9 і певний стан не може бути пронумерований то маємо неперервний випадковий процес. В результаті функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» для кожного моменту часу  $t$  ймовірність будь-якого стану системи в майбутньому залежить від її стану в теперішньому і не залежить від того, як система прийшла в цей стан то даний процес доцільно описувати марківським випадковим процесом.

Модель функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» представимо у виді графа, в якому стан (вершини) зв'язані між собою зв'язками (переходами з  $i$ -го стану в  $j$ -ий стан) рис. 3.



**Рис. 3.** Процес функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт»:  $S_0, S_1 \dots S_n$  – стан системи, якому відповідає певне величина коефіцієнта тертя ( $f_{\text{зар}}$ ) між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом;  $\lambda_{ij}$  – щільність ймовірності переходу.

**Fig. 3.** The process of functioning of the tribosystem "working body - soil":  $S_0, S_1 \dots S_n$  – the state of the system, which corresponds to a certain value of the coefficient of friction ( $f_{\text{zar}}$ ) between the surface of the working bodies of the tillage machines and the soil;  $\lambda_{ij}$  – the transition probability density.

Для заданого графу (рис. 3.) система диференціальних рівнянь Колмогорова має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = \lambda_{10}p_1(t) + \lambda_{20}p_2(t) + \lambda_{n0}p_n(t) - (\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{0n}) \times p_0(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_{01}p_0(t) + \lambda_{21}p_2(t) + \lambda_{n1}p_n(t) - (\lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{1n}) \times p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) + \lambda_{n2}p_n(t) - (\lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{2n}) \times p_2(t) \\ \frac{dp_n(t)}{dt} = \lambda_{0n}p_0(t) + \lambda_{1n}p_1(t) + \lambda_{2n}p_2(t) - (\lambda_{n0} + \lambda_{n1} + \lambda_{n2}) \times p_n(t) \end{cases} \quad (7)$$

$$p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_n(t) = 1$$

Даний граф (рис. 3.) можливо представити у вигляді матриці суміжності:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

Початкові умови (перед початком роботи коли відсутній процес тертя, стан  $S_0$ ):  $p_0(0) = 1, p_1(0) = p_2(0) = p_n(0) = 0$ .

У граничному стані  $t \rightarrow \infty$ , ймовірності покажуть середню відносну тривалість системи в цьому стані.

Дана система рівнянь Колмогорова дає змогу знаходити всі ймовірності значення коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом як функції часу.

## Висновки

1. Процес тертя між ґрунтом та поверхнею робочого органу не можливо описати законом Амонтова-Кулон, оскільки даний закон враховує тільки механічну складову процесу тертя. Встановлено, що на поверхні робочого органу ґрунтообробних машин при взаємодії з ґрунтом відбувається одночасно три види тертя (тертя ковзання, тертя кочення, тертя кочення з проковзуванням).

2. Рівняння (2) дозволяє при визначенні загального коефіцієнта тертя врахувати всі види тертя, які відбуваються на поверхні та адгезійну складову процесу тертя, а система рівнянь (7) дає змогу знаходити всі ймовірності значення коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом як функції часу.

## Список літератури

1. Ларченков Л. В., Протасеня М. Л., Протасеня И. О. Проектирование сельскохозяйственной техники. *Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. 2015. Вып. 29. С. 147-156.
2. Алексеев С. И., Хисамов Р. Р. Трение ґрунта о вертикальную стенку и его влияние на работу основания в шпунтовой обойме. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. Санкт-Петербург. 2013. № 4. С. 79-87.
3. Алексеев В. В., Максимов И. И., Мишин П. В. Получение функциональной зависимости для коэффициента трения в почвах. *Вестник НГИЭИ*. Княгинино. 2018. №5 (84). С. 34-43.
4. Ружьев В. А., Ожегов Н. М., Капошко Д. А. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин с учетом экологических требований. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2015. №38. С. 254-259.
5. Abbaspour-Gilandeh Y., Hasankhani-Ghavam F., Shahgoli G., Shrabian V. R., Abbaspour-Gilandeh M. Investigation of the effect of soil moisture content, contact surface material and soil texture on soil friction and soil adhesion coefficients. *Acta technologica agriculturae*. 2018. Tom 21, № 2. P. 44-50.
6. Marani S. M., Shahgoli G., Moinfar A. Effect of nano coating materials on reduction of soil adhesion and external friction. *Soil & tillage research*. 2019. Tom 193. P. 42-49.
7. Napiorkowski J., Lemecha M. Effect of phase structure of an abrasive soil mass on steel wear. *International symposium on material science and*

*engineering*. 2018. Том. 1946: URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5030316>.

8. *Бартенев И. М., Поздняков Е. В.* Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Лесотехнический журнал*. 2013. №3. 114-123.

### References

1. *Larchenkov, L. V., Protasenya, M. L., Protasenya, I. O.* (2015). Design of agricultural machinery. Engineering: Republican interdepartmental collection of scientific works. Vol. 29, 147-156.

2. *Alekseev, S. I., Xisamov, R. R.* (2013). Friction of the soil on the vertical wall and its impact on the work of the Foundation in the sheet holder. *Izvestia of St. Petersburg University of means of communication*. Saint-Petersburg, no 4, 79-87.

3. *Alekseev, V. V., Maksimov, I. I., Mishin, P. V.* (2018). Obtaining functional dependencies for the friction coefficient in soils. *Bulletin of NGIEI. Knyaginino*. no 5 (84). 5, 34-43.

4. *Ruzh`ev, V. A., Ozhegov, N. M., Kaposhko, D. A.* (2015). Ensuring the durability of the working bodies of tillage machines taking into account environmental requirements]. *Bulletin of Saint-Petersburg state agrarian University*. No. 38, 254-259.

5. *Abbaspour-Gilandeh Y., Hasankhani-Ghavam F., Shahgoli G., Shrabian V. R., Abbaspour-Gilandeh M.* (2018). Investigation of the effect of soil moisture content, contact surface material and soil texture on soil friction and soil adhesion coefficients. *Acta technologica agriculturæ*. 2, 44-50.

6. *Marani S. M. Shahgholi G. Moinfar A.* (2019). Effect of nano coating materials on reduction of soil adhesion and external friction. *Soil & tillage research*. 193, 42-49.

7. *Napiorkowski J., Lemecha M.* (2018). Effect of phase structure of an abrasive soil mass on steel wear. *International symposium on material science and engineering*. 1946: URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5030316>.

8. *Bartenev, I. M., & Pozdnyakov, E. V.* (2013). Wear ability of soils and its influence on the durability of the working bodies of tillage machines. *Forestry engineering journal*. No. 3, 114-123.

### ФРИКЦИОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЧВЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

*К. В. Борак*

**Аннотация.** Проектирование рабочих органов сельскохозяйственных машин должно основываться на физические, химические и механико-технологические свойства сельскохозяйственных материалов с которыми они взаимодействуют во время эксплуатации. Одной из характеристик дисперсных сельскохозяйственных материалов является коэффициент трения между ним и поверхностью рабочей органа. Наиболее сложным для исследования,

среди сельскохозяйственных материалов, является почва. Сложность его исследования связано со сложным строением, ведь почва является гетерогенной системой, содержащей твердую жидкую и газообразную фазы, а также живые организмы. Кроме того соотношение между фазами может изменяться во времени.

Исследование фрикционного взаимодействия двух твердых тел качественно раскрыто в современной литературе. В то же время вопросы взаимодействия твердого тела с дисперсной средой, а особенно с реальной почвенной массой остается нераскрытым.

В работе установлено, что при эксплуатации почвообрабатывающих машин, в зоне контакта рабочего органа и почвы, одновременно происходят все три вида трения (трение скольжения, трения качения и трения качения с проскальзыванием). Для определения общего коэффициента трения между поверхностью рабочего органа почвообрабатывающих машин и почвой с учетом всех возможных видов трения составлена соответствующая зависимость. Разработанная система уравнений Колмогорова, которая позволяет находить все вероятности значения коэффициентов трения между поверхностью рабочих органов почвообрабатывающих машин и почвой как функции времени.

**Ключевые слова:** коэффициент трения, рабочий орган, почва, скольжение, качение, почвообрабатывающая машина.

### FRICIONAL INTERACTION BETWEEN SOIL AND SURFACE OF TILLING MACHINE MOVABLE OPERATING PARTS

*K. V. Borak*

**Abstract.** Principles of design of the agricultural machine movable operating parts shall be based upon physical, chemical and process mechanical properties of the agricultural materials, which they interact with during operation. One of the main parameters of the dispersed agricultural materials is the coefficient of friction between them and the surface of the movable operating part. The soil is considered to be the most difficult agricultural material to study. The complexity of the study is conditioned by a complex structure as the soil is a heterogeneous system containing solid, liquid and gaseous phases, as well as living organisms. Moreover, phase to phase ratio may vary with time.

Modern bibliographic sources provide extensive coverage of the studies in the field of the frictional interaction between two solid-state bodies. At the same time, the issue of the interaction between the solid-state body and dispersed medium, in particular with the real soil material still remains undiscovered.

As it follows from the study, three types of friction (sliding (kinetic), rolling, as well as combined rolling and sliding one) occur simultaneously during operation within the area of contact between the movable operating part and soil. A corresponding dependency is established in consideration of all possible types of friction to determine the overall coefficient of friction between the surface of the tilling machine movable operating part surface and soil. The Kolmogorov equation system has been developed to

provide the option of determining all probabilities in respect of values of coefficients of friction between the surface of the tilling machine movable operating parts and soil as time variables.

**Key words:** coefficient of friction, movable operating part, soil, sliding, rolling, tilling machine.

**К. В. Борак** ORCID 0000-0002-5611-4707.