

МЕХАНІЗАЦІЯ

УДК 631.4; 631.31

ВИКОРИСТАННЯ РЕОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ ҐРУНТУ

С. М. Кухарець, М. М. Кухарець

e-mail: saveliy_76@ukr.net

Житомирський національний агроекологічний університет
бульвар Старий, 7, м. Житомир, 10008, Україна

Перевірка параметрів пропонує технічних рішень при розробці ґрунтообробних робочих органів може бути виконана в лабораторних умовах. Пропонується методика імітаційного моделювання динаміки взаємодії робочих органів з реологічними моделями ґрунту. Наводиться методика створення реологічної моделі, а також результати експериментального обґрунтування параметрів робочого органу ґрунтообробного знаряддя.

Пропонується методика моделювання ґрунтового середовища та відповідне експериментальне обладнання можуть бути використаними для дослідження взаємодії коліс та робочих органів машинно-тракторних агрегатів із ґрунтом.

Ключові слова: середовище, параметри, робочий орган, макет, парафін.

Постановка проблеми

На стадії розробки технічної пропозиції і, в подальшому, технічного завдання на проектування перспективних робочих органів ґрунтообробних знарядь виникає проблема вибору оптимального варіанту конструкції та узгодження рішень, що приймаються, із загальними та специфічними вимогами, вимогами стандартів та інших нормативних документів, що регламентують виконувати робочі процеси. Аналітично обґрунтовані параметри робочого органу (конструкційні, кінематичні, динамічні тощо) мають бути апробовані, з точки зору раціональності пропонує рішень. Перевірка аналітично обґрунтованих рішень ускладнена з огляду на багатоваріантність пропозицій, і пов'язана із значними матеріальними витратами на виконання експериментів у польових умовах. Разом з тим, відомо [1], що на стадії технічної пропозиції пропонує рішення можуть бути апробовані у вигляді макетного зразка або діючої моделі. Така апробація зводить до мінімуму можливі помилки при розробці технічного завдання та подальшого проектування технологічних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перевірка параметрів пропонує технічних рішень при розробці ґрунтообробних

робочих органів може бути виконана в лабораторних умовах на макетних зразках з використанням моделі-імітаторі ґрунтового каналу [2].

Модель-імітатор виконано у вигляді жолобу 1 з розміщеною в ньому реологічною моделлю ґрунту. Над жолобом на двох направляючих 2 встановлено візок 3 з підвіскою, на якій розміщено два досліджувані макети робочих органів, що виконані в масштабі 1:5. Візок приводиться в рух електродвигуном 4 за допомогою тяги 5.

Дослідження робочих органів на моделі-імітаторі, з точки зору взаємодії з ґрунтом, становить певну складність з огляду вибору матеріалу для реологічної моделі ґрунту. З усієї різноманітності відомих в наш час моделей реологічних властивостей ґрунту найбільш задовільно його поведінка описується в умовах пружно-в'язко-пластичного релаксуючого руйнування моделлю Шведова (рис.1а), [3] та реологічною моделлю зсувних деформацій ґрунту, яка запропонована А. С. Кушнар'євим (рис.1б) [4, 5], реологічні формули яких, відповідно, мають вигляд:

$$Schw = H - (M | StV), \quad (1)$$

$$Ku = M - (M | StV). \quad (2)$$

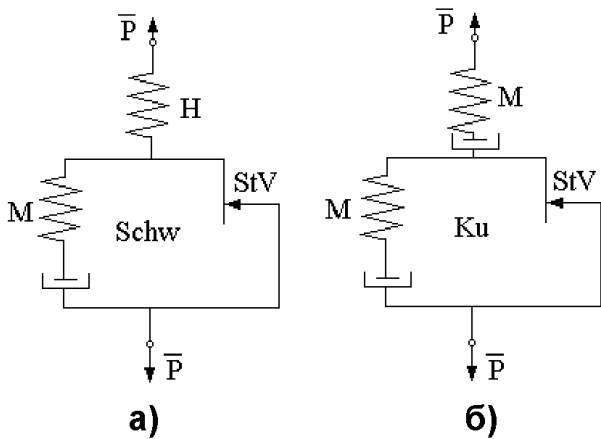


Рис. 1. а) реологічна модель пружнов'язкого тіла Шведова, б) узагальнена реологічна модель ґрунту для зсувних деформацій (Кушнар'юв)

Діаграму переміщень ϵ , в залежності від зсувних напружень τ , для моделі Шведова представлено на рис. 2а, а для моделі запропонованої Кушнар'ювим – на рис. 2б.

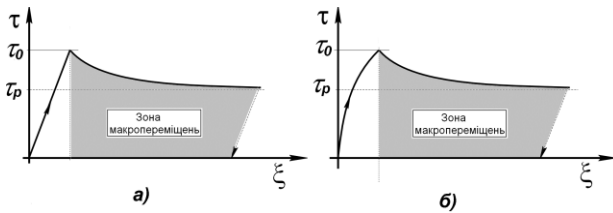


Рис. 2. Діаграми переміщень (τ_0 – початкове граничне напруження зсуву при миттєвому навантаженні; τ_p – межа релаксації напружень): а – для моделі Шведова, б – для моделі Кушнар'юва

Мета, завдання та методика дослідження

Мета дослідження: вибір модельного середовища ґрунту; визначення основних параметрів ротаційно-лопатевого робочого органу ґрунтообробного знаряддя.

При виборі матеріалу, для виготовлення моделі ґрунту, виходячи з [6, 7], необхідно змодельовати властивості ґрунтового середовища в період макропереміщення структури, яка згідно з [4, 5, 8] визначається релаксаційною ділянкою (зона макропереміщень на рис.2). При цьому, реологічною характеристикою ґрунту є напруження релаксації τ_p .

Граничні початкові напруження τ_0 для ґрунту визначалися за методом Ребіндера (рис.3) зануренням у середовище стандартного конусу під дією певного навантаження [3, 9], (табл. 1).

Таблиця 1. Визначення граничних початкових напружень за Ребіндером

	$\tau_0 = k_a \frac{P_H}{h_s^2} \quad (3)$
<p>де k_a – коефіцієнт, що враховує величину кута при вершині конуса (при $\alpha_s=30^\circ$, $k_a=1,108$; при $\alpha_s=45^\circ$, $k_a=0,658$; при $\alpha_s=60^\circ$, $k_a=0,413$; при $\alpha_s=90^\circ$, $k_a=0,159$); P_H – величина прикладеного навантаження, Н; h_s – глибина занурення конусу в ґрунт, м</p>	

Згідно із дослідженнями [10], граничні початкові напруження для дерново-підзолистих ґрунтів середньої степені оглеювання варіюють у межах: $\tau_0=0,10...0,17$ МПа.

Величину межі релаксації напружень можна визначити за формулою:

$$\tau_p = k_p \cdot \tau_0, \quad (4)$$

де k_p – коефіцієнт релаксації (згідно з [10, 11] для зсувних деформацій ґрунту модельний коефіцієнт релаксації лежить у межах: $k_p=0,65...0,7$).

Найбільш повно ділянка деформаційної кривої на рівні τ_p описується за допомогою моделі Прандтля (рис. 3) [12]:

$$Pr = H - StV. \quad (5)$$

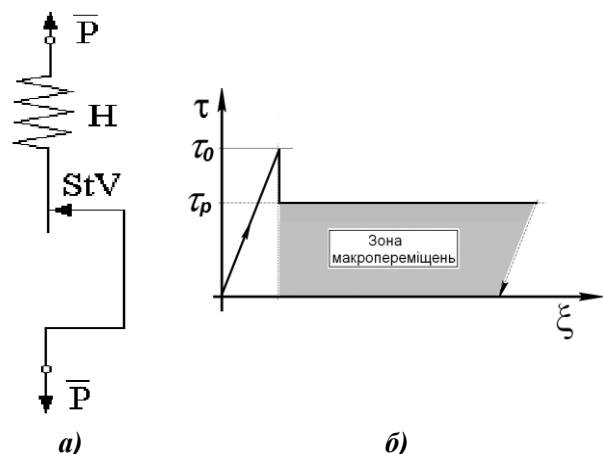


Рис. 3. а) Модель пружно-пластичного тіла Прандтля; б) діаграма переміщень

Згідно з моделлю Прандтля (рис. 4), для адекватного імітування роботи запропонованого ґрунтообробного ротаційного робочого органу для

моделі ґрунту необхідно підібрати матеріал з $\tau_p = \tau_{0m} = 0,07 \dots 0,12$ МПа, який має відповідати діаграмі на рис.4.



Рис. 4. Діаграма переміщень моделі реологічного тіла (середовища)

Для вибору матеріалу моделі вивчалися властивості парафіну, змішаного з різноманітними наповнювачами (піском, глиною, гліцерином, олією, масляною фарбою) при різних температурах. За результатами аналізу реологічних властивостей досліджуваних матеріалів, які мають імітувати реальний дерново-підзолистий супіщаний ґрунт середнього ступеня оглеєння, обрано модельне середовище в складі парафіну та важких фракцій рослинної олії (у пропорції 1,5:1, відповідно) з $t = 35 \dots 40^\circ$, та величиною межі напруження релаксації $\tau_p = \tau_{0m} = 0,09 \dots 0,10$ МПа, визначеною за Ребіндером (3) [9].

Швидкість руху візка обиралася за теорією подібності з використанням критерію Рейнольдса:

$$Re = \frac{S}{V} \quad (6)$$

де S – визначаючий розмір (в даному випадку глибина обробітку ґрунту);

V – визначаюча швидкість (лінійна швидкість руху ротора).

Згідно з формулою (6), швидкість візка становила 0,3–0,5 м/с, що відповідає робочим швидкостям машинно-тракторного агрегату 5–10 км/год. Регулювання швидкості виконувалося двома способами: дискретно – за допомогою зміни радіусу приводного блока 6 (рис. 1) і плавно – за

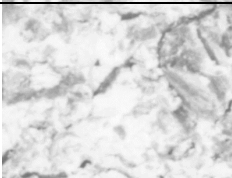
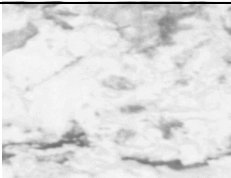
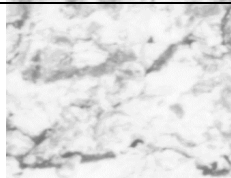
допомогою зміни напруги живлення електродвигуна.

Схема виконання досліду: модель ґрунтових шарів підфарбовується масляними фарбами різних кольорів, що дозволяє після охолодження парафіну сфотографувати результати дослідів у поздовжньому і поперечному перерізах ґрунтового каналу, а також дослідити переміщення шарів ґрунту під впливом моделі робочого органу. Після підігрівання парафіну ($t \approx 30 \dots 40^\circ\text{C}$) виконується прохід робочих органів; фотографується поверхня моделі ґрунту, а після охолодження парафіну поздовжній і поперечний переріз каналу. Результати досліду опрацьовуються на комп'ютері методом числового аналізу візуальної інформації за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми. Після сканування отриманого фотознімку візуальна інформація перетворюється в числовий масив за ознаками інтенсивності і кольору з роздільною здатністю 72 піксели/см. Описаний числовий масив після відповідної статистичної обробки та узагальнення інформації про стан поверхні моделі-імітатора дозволяє визначити показник повноти заробки, як відношення площі поверхні з повною заробкою верхнього шару до всієї площі обробленої поверхні.

Результати досліджень

За результатами досліджень моделі-імітатора отримано візуальні данні у вигляді серії фотознімків (табл. 2) з характеристиками просторового розташування окремих частин оброблюваного шару ґрунту за глибинами 0...2, 2...5, 5...7 см. Після математичного обробітку результатів комп'ютерного аналізу серії фотографій модельної поверхні ґрунту побудовано експериментальні залежності показника заробки k_z ротаційно-лопатових робочих органів: від довжини s робочої поверхні (рис. 5), від кута закручування γ_0 робочої поверхні ножа-лопати (рис. 6) та кута атаки β (рис. 7).

Таблиця 2. Графічне представлення модельної поверхні ґрунту

Вигляд модельної поверхні	Повторність досліду при $s=35\text{мм}$; $\gamma_0=24^\circ$; $\beta=20^\circ$		
	№1	№2	№3
			
k_z	84,7	86,6	83,6

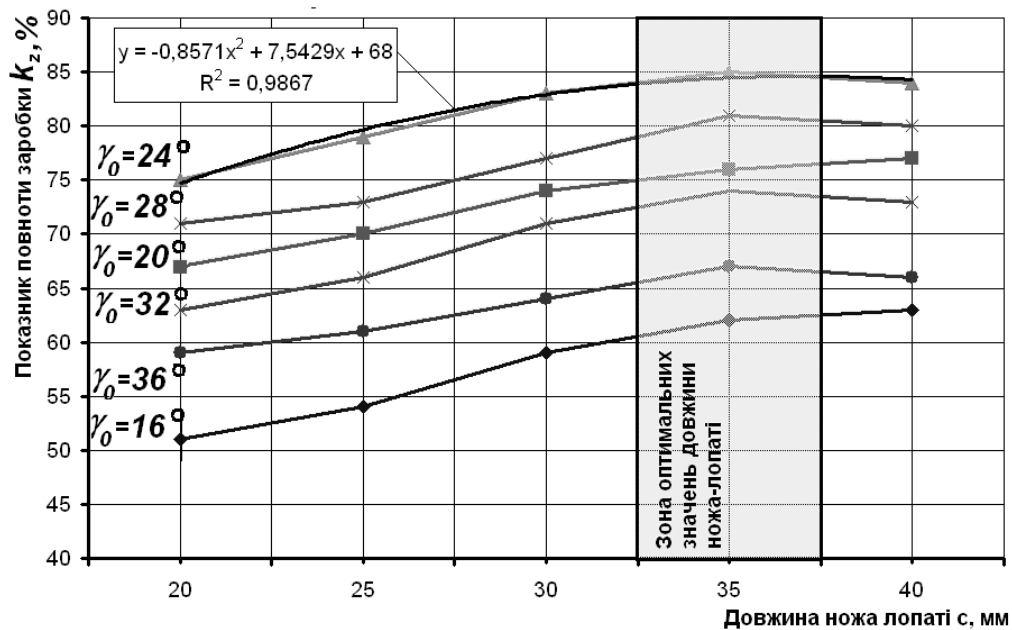


Рис. 5. Графіки залежностей показника заробки від довжини ножа-лопаті та кута закручування робочої поверхні

Аналіз залежностей (рис.6) свідчить про те, що показник заробки пропонованого робочого органу зі збільшенням довжини ножа-лопаті з 20 мм до 35 мм збільшується майже лінійно, а зі збільшенням довжини до 40 мм зменшується, що можна пояснити заляпанням проміжку між робочими органами та, як наслідок, погіршенням агротехнологічних показників обробітку.

Максимальний показник заробки досягається при використанні робочих органів з кутом закручування робочої поверхні 24°, і його визначено відповідно до (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,987$):

$$k_{24^\circ} = -0,86c^2 + 7,54c + 68; \tag{7}$$

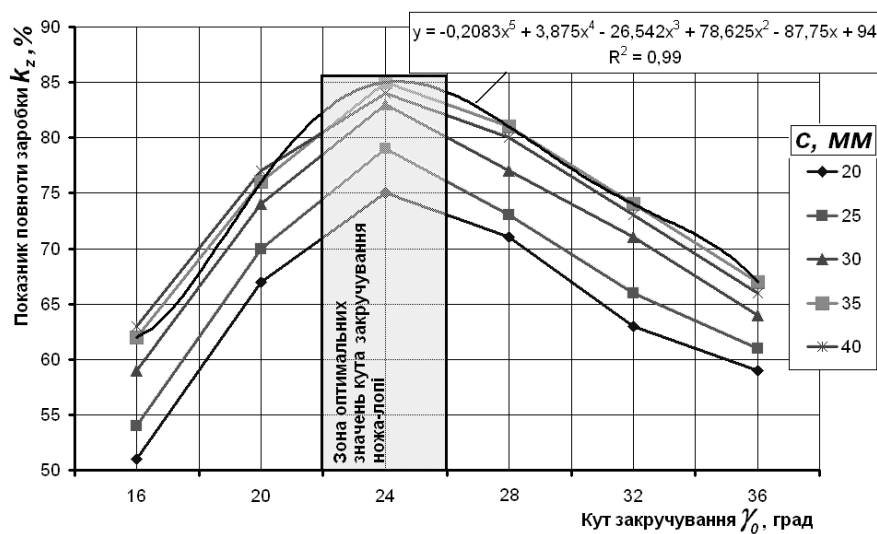


Рис. 6. Графіки залежностей показника заробки від кута закручування робочої поверхні ножа-лопаті та довжини ножа-лопаті

За результатами аналізу залежності показника заробки від кута γ_0 (рис.7) можна зробити висновок, що при збільшенні кута закручування з 16° до 24° показник заробки зростає і становить 85%, при подальшому збільшенні кута до 36° закручування відбувається зменшення значення показника заробки. Отже, при куті закручуванні ножа-лопати ($\gamma_0 = 24$) профіль передньої поверхні є найоптимальнішим, з точки зору як розпушуючої, так і обертаючої здатності знаряддя. Крім того, необхідно зауважити, що максимальний показник заробки досягається за довжини ножа-лопати, яка становить 35 мм і визначений, з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,99$, поліномом:

$$k_{35} = -0,21\gamma_0^5 + 3,88\gamma_0^4 - 26,54\gamma_0^3 + 78,63\gamma_0^2 - 87,75\gamma_0 + 94. \quad (8)$$

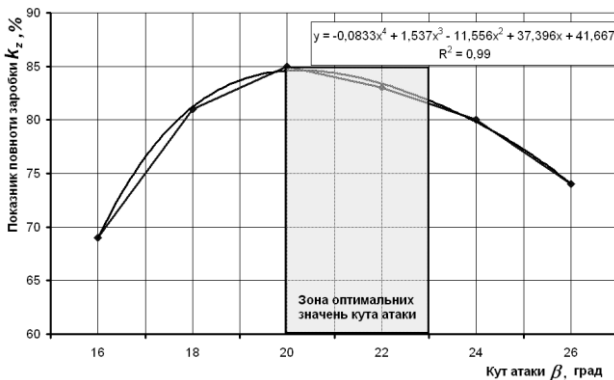


Рис. 7. Графік залежності показника заробки від кута атаки батареї робочих органів при $c=35\text{мм}$, $\gamma_0=24^\circ$

За викладеним вище аналізом результатів модельного експерименту визначено кут β установки робочих органів (рис.8). З аналізу залежності (рис. 78) показника заробки k_z від кута атаки β при оптимальних значеннях довжини $c=35\text{мм}$ та кута закручування $\gamma_0 = 24^\circ$ робочої поверхні ножа-лопати впливає, що найбільше значення показник заробки має при кутах атаки в межах $20^\circ..23^\circ$. При куті $\beta = 20^\circ$ перекриття зон обробки сусідніх роторів батареї набуває мінімально-граничного значення, а при подальшому збільшенні кута атаки відбувається зниження значення показника заробки. Таким чином, залежність показника заробки і кута атаки батареї робочих органів можна виразити з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,99$, за допомогою поліному:

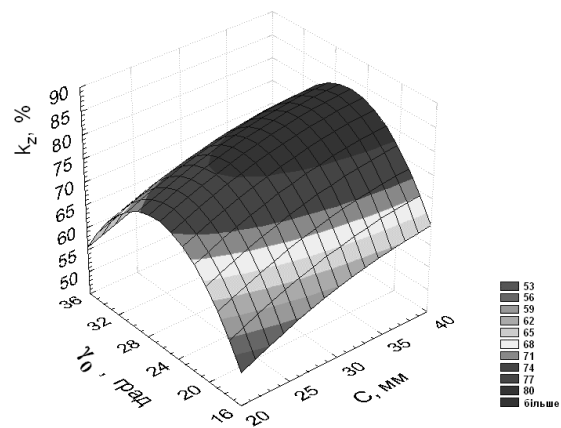
$$k_z = -0,08\beta^4 + 1,54\beta^3 - 11,56\beta^2 + 37,40\beta + 41,68. \quad (9)$$

Повний регресивний аналіз результатів експериментів з оптимізації конструкційних параметрів ножів-лопатей (довжини c та кута закручування γ_0 робочої поверхні), відповідно до плану двофакторного експерименту 2^2 , дозволив визначити коефіцієнти регресії відповідного рівняння:

$$k_z = -89,29 + 2,03 \cdot c + 9,98 \cdot \gamma_0 - 2,2 \times 10^{-2} \cdot c^2 - 7 \times 10^{-3} \cdot c \cdot \gamma_0 + 1,9 \times 10^{-1} \cdot \gamma_0^2. \quad (10)$$

Визначенні коефіцієнти регресії рівняння (10) дозволяють графічно окреслити поверхню відгуку (9).

Рис. 8. Поверхня відгуку показника повноти обробки k_z в залежності від ширини c та кута закручування γ_0 робочої поверхні ножа-лопати



Дослідження поверхні (рис. 8) на екстремум дозволяє остаточно встановити такі параметри робочого органу:

- довжина робочої поверхні ножа лопаті $c = 35\text{мм}$ (з урахуванням масштабного коефіцієнту $\mu = 5$, довжина робочої поверхні ножа-лопати становить 175мм);
- кут закручування передньої робочої поверхні $\gamma_0 = 24^\circ$;
- кут атаки батареї робочих органів становить $\beta = 20^\circ$.

Ці параметри забезпечують максимальний показник заробки k_z на рівні 85 %.

Висновки та перспективи подальших досліджень

В результаті імітаційного моделювання встановлено: довжина полиці ножа лопаті ротаційно-лопатевого робочого органу $c=0,175\text{ м}$; кут закручування твірної $\gamma_0=24^\circ$; оптимальний кут атаки батареї пропонованих робочих органів $\beta = 20^\circ$.

Пропонована методика імітаційного моделювання динаміки взаємодії робочих органів з реологічними моделями ґрунту та відповідне експериментальне обладнання можуть бути використаними для дослідження широкого спектру ґрунтообробних ротаційних робочих органів.

Література

1. Ahmadi I. Development and assessment of a draft force calculator for disk plow using the laws of classical mechanics / I. Ahmadi // Soil and Tillage Research. – 2016. – № 163 – P. 32–40.
2. Raiesi F. Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment / Raiesi F., Kabiri V. // Ecological Indicators. – 2016. – № 71. – P. 198–207.
3. Гольдштейн М. Н., Механические свойства ґрунтов / М. Н. Гольдштейн. – М. : Издательство литературы по строительству, 1971. – 368 с.
4. Кушнарєв А. С. Механика почв: Задачи и состояние работ / А. С. Кушнарєв // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1987. – № 3. – С. 9–13.
5. Кушнарєв А. С. Механико-технологические основы обработки почвы / А. С. Кушнарєв, В. И. Кочев – К. : Урожай, 1989. – 144 с.
6. Predictive modelling of weed seed movement in response to superficial tillage tools / Colbach N., Busset N., Roger-Estrade J., Caneill J. // Soil and Tillage Research. – 2014. – № 138. – P. 1–8.
7. Шелудченко Б. А. Агромеханіка ґрунтів / Б. А. Шелудченко. – Житомир, Полісся, 1992. – 249 с.
8. Кулен А. Современная земледельческая механика / Кулен А., Куиперс Х; пер. с англ. А. Э. Габриэляна. под ред. Ю. А. Смирнова. – М. : Агропромиздат, 1986. – 249 с.
9. Білецький В. Р. Теоретичне обґрунтування стану ґрунту під колісним рушієм машинно-тракторного агрегату / В. Р. Білецький, В. О. Шубенко, І. С. Томашевський // Вісник ЖНАЕУ. – 2014. – № 1 (39), т. 1. – С. 176–186.
10. Булгаков В. М. Самоорганізація ґрунтових структур / В. М. Булгаков, Б. А. Шелудченко. – К. : НАУ, 1998. – 58 с.
11. Golub G. Determining the magnitude of traction force on the axes of drive wheels of self-propelled machines / G. Golub, V. Chuba, S. Kukharets // Eastern-European Journal of

Enterprise Technologies. – 2017. – № 4/7 (88). – P. 50–56.

12. Мильніков О. В. Опір матеріалів / О. В. Мильніков – Тернопіль : ТДТУ ім. Івана Пулюя, 2005. – 212 с.

USE OF RHEOLOGICAL MODEL OF SOIL

S. M. Kukharets, M. M. Kukharets

e-mail: saveliy_76@ukr.net

Zhytomyr National Agroecological University,
Stary Boulevard, 7, Zhytomyr, 10002, Ukraine

Verification of the parameters of the proposed technical solutions in the development of soil working machinery can be performed in laboratory conditions. The method of simulation modeling of interaction of working bodies with rheological models of soil is offered. The method of creating a rheological model is presented. The results of experimental substantiation of the parameters of the working body of the soil-working tool are presented.

The proposed simulation method of the soil environment and appropriate experimental equipment can be used to study the interaction of wheels and working bodies of machine-tractor aggregates with soil.

Keywords: environment, parameters, working body, layout, paraffin.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЧВЫ

С. Н. Кухарец, Н. Н. Кухарец

e-mail: saveliy_76@ukr.net

Житомирский национальный
агроэкологический университет

Старый бульвар, 7, г. Житомир, 10002, Украина

Проверка параметров предлагаемых технических решений при разработке почвообрабатывающих рабочих органов может быть выполнена в лабораторных условиях. Предлагается методика имитационного моделирования динамики взаимодействия рабочих органов с реологическими моделями почвы. Приводится методика создания реологических моделей, а также результаты экспериментального обоснования параметров рабочего органа почвообрабатывающего орудия.

Предлагаемая методика моделирования почвенной среды и соответствующее экспериментальное оборудование могут быть использованы для исследования взаимодействия колес и рабочих органов машинно-тракторных агрегатов с ґрунтом.

Ключевые слова: Среда, параметры, рабочий орган, макет, парафин.