

СИМУЛЯЦІЯ РЕОЛОГІЇ ҐРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА У «COMSOL»

Халін С., канд. екон. наук,

<https://orcid.org/0000-0002-7510-5056>

Сербій В., канд. техн. наук, с.н.с.,

<https://orcid.org/0000-0002-1503-4866>

Гайдай Т., канд. техн. наук,

<https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>,

Муха В., <https://orcid.org/0000-0001-7870-0187>

Степченко С., <https://orcid.org/0000-0003-2808-9644>,

Шулик А.

ДНУ УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого

Анотація

Мета – підвищення ефективності оцінки відповідності та функціонування ґрунтообробних машин шляхом субституції фізичної моделі комп'ютерним моделюванням.

Методи – аналіз і систематизація науково-технічної інформації щодо формалізації впливу ґрунтових робочих органів на ґрунтове середовище, аналітичні дослідження представлення моделі ґрунту, експериментальна перевірка комп'ютерної моделі на адекватність.

Результати. Адаптовано автоматизовану систему з моделювання рідинних течій до потреб землеробської механіки, зокрема програмний комплекс «Comsol» для імітації властивостей ґрунтового середовища, що дає змогу моделювати його напружено-деформований стан під впливом робочого органу будь-якої заданої конфігурації й отримувати тягово-енергетичні показники, що можуть бути доказовою базою у процесі порівняння прототипів із аналогами.

Для перевірки адекватності імітаційної моделі проведено польові дослідження з визначення тягового опору експериментального зразка лапового сошника з робочою шириною 410 мм для глибин ходу 4 та 8 см на змінних швидкостях руху 1,07 та 2,07 м/с. Отримані експериментальні дані щодо тягового опору лапового робочого органу порівняно з отриманими теоретичним шляхом даними за використання чисельного імітаційного моделювання у програмному комплексі «Comsol». За проведеною статистичною оцінкою даних досліджень щодо тягового опору лапового сошника встановлено, що за критерієм Фішера при встановленому рівні значимості $\alpha=0,05$ модель є статистично надійна $F > F_{\text{табл}}$.

Висновки. Розроблено валідовану методику симуляції ґрунтового середовища з отриманням тягово-енергетичних показників роботи ґрунтових робочих органів. Імітаційна модель розробленого методу моделювання ідентифікована за критерієм Фішера та є статистично надійною. Економічний ефект забезпечується скороченням трудомісткості та ресурсоемності робіт, втрат часу та забезпечується рівність умов випробувань для всіх досліджуваних технічних засобів.

Ключові слова: ґрунтове середовище, модель, симуляція, імітація, робочі органи, Comsol.

Вступ. Випробування ґрунтообробної техніки є ключовим етапом для забезпечення її ефективної роботи в різних агрономічних і кліматичних умовах. Однак цей процес супроводжується низкою проблем, які можуть впливати на точність результатів, надійність техніки та її ефективність

у реальних умовах. Основними проблемами, з якими стикаються при випробуваннях ґрунтообробної техніки, є варіативність ґрунтових умов, об'єктивність результатів випробувань, економічні аспекти, екологічні та регуляторні обмеження, оцінка довгострокових ефектів, людський фактор.

Ґрунт на різних ділянках поля може мати різну щільність, вологість, текстуру (піщаний, глинистий, суглинковий тощо), що ускладнює стандартизацію умов випробувань. Вологий ґрунт може значно відрізнятися за своєю реологією від сухого, що ускладнює прогнозування поведінки техніки в умовах, коли рівень вологості нестабільний. Такі параметри, як ступінь розпушеності ґрунту чи рівень аерації після обробки є важливими, однак їх складно оцінити об'єктивно [Лупенко, Месель-Веселяк, 2012; Месель-Веселяк, Федоров, 2016; Бурачек, Михайленко, 2018].

Техніка може демонструвати неоднакову продуктивність на різних типах ґрунтів (піщаний, глинистий), тому випробування в обмежених умовах можуть не давати повного уявлення. Окрім того, сучасні ґрунтообробні машини повинні оцінюватися за допомогою високоточних сенсорів і систем вимірювань, що часто є дорогими або складними в обслуговуванні. На ефективність ґрунтообробної техніки можуть одночасно впливати десятки факторів, включаючи швидкість руху, кут атаки лез, глибину обробки, що робить випробування технічно складними.

Тестування техніки у великих масштабах може впливати на стан ґрунтів і навколишнє середовище (наприклад, ерозія ґрунту), що вимагає додаткових заходів для мінімізації шкоди. У різних країнах можуть бути свої вимоги до випробувань техніки, що вимагає адаптації або повторних тестів для відповідності місцевим нормативам [Власенко, 2019].

Важко оцінити, як довго техніка буде ефективною на певному типі ґрунту без довготривалих випробувань, оскільки деякі зміни в ґрунті (наприклад, ущільнення) можуть проявитися лише через певний час.

Використання ґрунтообробної техніки може впливати на агрохімічні процеси, наприклад, зміну балансу мінералів або рівня органічної речовини в ґрунті, що складно передбачити в короткострокових випробуваннях.

Робота техніки значною мірою залежить від кваліфікації оператора, який

може впливати на результати випробувань. Різні оператори можуть досягати різних результатів із тією ж технікою. Оцінка деяких параметрів може бути суб'єктивною (наприклад, візуальна оцінка якості розпушення ґрунту), що вносить елемент неточності.

Постановка завдань. Проблеми випробувань ґрунтообробної техніки виникають на стику наукових досліджень, технічних можливостей та економічних реалій. Вирішення цих проблем можливе шляхом розвитку нових технологій вимірювання, вдосконалення моделей симуляції ґрунтових умов та кращої стандартизації процесу тестування [Доспехов, 1985].

У зв'язку з цим великого практичного значення набуває математичне програмування з використанням сучасної швидкодіючої електронно-обчислювальної техніки, що дає змогу створювати складні моделі навколишнього середовища та проводити числове моделювання взаємодії ґрунтових робочих органів із модельним середовищем, використовуючи графічну візуалізацію результатів розрахунків.

Симуляція реології ґрунту — це процес моделювання поведінки ґрунту під дією зовнішніх факторів, наприклад, механічного навантаження, тиску чи зміни температури з використанням фізичних і математичних моделей. Реологія в цьому контексті стосується вивчення того, як матеріал (у цьому випадку ґрунт) реагує на різні види деформацій, тобто тече, деформується або руйнується [Кушнарев, 1989].

Основні етапи симуляції реології ґрунту - вибір моделі реології, збір даних про ґрунт, вибір чисельного методу, проведення симуляції, аналіз результатів.

Є різні реологічні моделі, які описують поведінку ґрунту:

- лінійна модель пружності (закон Гука), що використовується для моделювання еластичної поведінки ґрунту;

- пластичні моделі (наприклад, модель Мора-Кулона), застосовуються для опису деформацій при перевищенні межі пружності;

- в'язкопружні та в'язкопластичні мо-

делі, наприклад, моделі Максвелла або Кельвіна-Фойгта, які описують поведінку ґрунту, що поєднує еластичні та в'язкі властивості.

Для точного моделювання потрібно знати такі параметри ґрунту, як вологість, щільність, коефіцієнт тертя, міцність на стиск і розтяг, структура пор (гранулометричний склад).

Для проведення симуляцій використовуються чисельні методи:

- метод скінченних елементів (FEM), який широко використовується для моделювання деформацій у ґрунтах, оскільки дає змогу розділити складні структури на менші елементи;

- метод дискретних елементів (DEM), що підходить для моделювання ґрунтів як окремих частинок і їхньої взаємодії.

Після налаштування моделі та введення параметрів ґрунту симуляція проводиться з урахуванням прикладених навантажень, що дає змогу спостерігати за тим, як ґрунт деформується або пливе під тиском.

Перевагами симуляції є економія на експериментах і тестуваннях у реальних умовах, скорочення часу на дослідження складних ґрунтових процесів, безпомилковість порівняння прототипів техніки з аналогом.

Мета досліджень — підвищення ефективності оцінки відповідності та функціонування ґрунтообробних машин шляхом субституції фізичної моделі комп'ютерним моделюванням.

Методи і матеріали. Донедавна визначення якісних та енергетичних параметрів проводилися агротехнічною оцінкою та хронометражем. Однак зараз розвиток світового сільськогосподарського машинобудування сприяв появі на ринку великої кількості сільгоспмашин із різноманітною конструкцією. Перевірити вищеозначені параметри кожної з них неможливо в нинішніх складених ринкових умовах. Тому розроблено робочу гіпотезу — підвищення показників якості роботи та зменшення енерговитрат на виконання технологічного процесу сільгоспмашинами можливе за

рахунок створення та використання у дослідженнях імітаційного середовища.

«COMSOL Multiphysics» — це програмне забезпечення для аналізу методом скінченних елементів, вирішення та імітації різноманітних фізичних та інженерних завдань, особливо для міждисциплінарних явищ або мультифізики. Запропонована методика дає змогу налаштувати обчислювальний процес так, щоб відтворити властивості ґрунту у програмі «COMSOL» і провести чисельні моделювання роботи ґрунтових робочих органів [COMSOL, 2015].

Відомі такі моделі пластичності ґрунту, що також реалізовані у «COMSOL» для встановлення цих властивостей матеріальному середовищу:

1) Критерій Мора-Кулона

$$|\tau| - \sigma \tan \varphi - c = 0$$

2) Критерій Друкера-Прагера

$$F_y = \sqrt{J_2 + \alpha l_1} - k = 0$$

3) Критерій Матсуока-Накаї

$$F_y = (9 + 9\mu^2)l_3 - l_1 l_2 = 0$$

4) Критерій Ладе-Дункана

$$F_y = k l_3 - l_1^3 = 0$$

Відомі такі моделі пружно-пластичних ґрунтів, що також реалізовані у «COMSOL» для завдання цих властивостей матеріальному середовищу:

1) Модифікована Кем-Клея

$$q = \sqrt{3J_2(\sigma)}; p = -l_1(\sigma)/3$$

$$F_y = q^2 + M^2(p - p_c)p = 0$$

2) Модифікована Кем-Клея для безкогезійних середовищ

$$F_y = q^2 + M^2(p + p_b)(p - p_c) = 0$$

3) Розширена Барселонська базова

$$F_y = q^2 + M^2(p - p_{cs})(p + p_s) +$$

$$+ p_{ref}^2 \left(e^{\frac{b(s-s_y)}{p_{ref}}} - e^{\frac{-bs}{p_{ref}}} \right)$$

4) Зміцнення ґрунту

$$F_y = q_a \left(\frac{q_a \sqrt{3J_2}}{E_{50}(q_a - \sqrt{3J_2})} - \frac{2\sqrt{3J_2}}{E_{ur}} - \gamma_p \right)$$

Є такі моделі повзучості ґрунтів, що також реалізовані у «COMSOL» для налаштування цих властивостей матеріально-му середовищу:

1) Квазістатична постановка для виключення інерційних полів

2) Модель потенціалу

$$\varepsilon_{cr} = \eta \frac{\delta Q_{cr}}{\delta \sigma}, \eta > 0$$

3) Об'ємна повзучість

$$\varepsilon_{cr} = \frac{1}{3} \varepsilon_{cr,vol} I$$

4) Девіаторна модель повзучості

$$\varepsilon_{cr} = \frac{1}{3} \varepsilon_{cre} n^D, n^D = \frac{3}{2} \frac{dev(\sigma)}{\sigma_e}$$

Інтерфейси однофазного потоку рідини базуються на рівняннях Нав'є–Стокса, які в найзагальнішому вигляді мають вигляд [Ладиженська, 1970; Темам, 1981]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p \mathbf{I} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} \quad (2)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = -(\nabla \cdot \mathbf{q}) + \mathbf{K} : \mathbf{S} - \frac{T}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) p \right) + Q \quad (3)$$

де

ρ – густина, кг/м³;

$\mathbf{u}$ – вектор швидкості, м/с;

p – тиск, Па;

$\mathbf{I}$ – одинична матриця (безрозмірна);

$\mathbf{K}$ – тензор в'язкої напружки, Па;

$\mathbf{F}$ – вектор об'ємної сили, Н/м³;

C_p – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К);

T – абсолютна температура, К;

$\mathbf{q}$ – вектор теплового потоку, Вт/м²;

Q – джерело тепла, Вт/м³;

$\mathbf{S}$ – тензор швидкості деформації:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \quad (4)$$

Рівняння 1 є рівнянням неперервності та відображає збереження маси. Рівняння 2 є векторним рівнянням, яке відображає збереження імпульсу. Рівняння 3 описує збереження енергії, сформульоване через температуру. Це інтуїтивно зрозуміле формулювання, яке полегшує специфікації граничних умов.

Щоб замкнути систему рівнянь, рівняння 1-3, для ньютонівської рідини, яка має лінійну залежність між напругою та деформацією, Стокс вивів такий вираз:

$$\mathbf{K} = 2\mu \mathbf{S} - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \quad (5)$$

Динамічна в'язкість, μ (Па·с) для ньютонівської рідини може залежати від термодинамічного стану, але не від поля швидкості. Для непружної неньютонівської рідини залежність між напруженням і швидкістю деформації є нелінійною, і замість динамічної в'язкості вводиться уявна в'язкість [Koon, Haraksingh, 2013; Zhang, Ge, Meng et al., 2021; Nabatov, Voznesenskii, 2023].

За допомогою модуля CFD можна моделювати потоки неньютонівських рідин, використовуючи попередньо визначені конститутивні моделі. Доступні такі моделі, які описують співвідношення напруга-деформація для неньютонівських рідин: степеневий закон, Карро, Бінгема–Папанастазіу, Гершеля–Балклі–Папанастазіу та Кассона–Папанастазіу. Теоретично одні й ті ж рівняння описують як ламінарні, так і турбулентні течії [Shen et al., 2022; Yan et al., 2025].

Етапи створення моделі ґрунтового середовища – робочі органи:

1. Створення розрахункової області та імпорту/створення твердотільної комп'ю-

терної моделі прототипу робочого органу.

2. Завдання математичної моделі та початкових параметрів для ґрунту і ґрунтообробних робочих органів.

3. Встановлення граничних умов.

4. Побудова вихідної розрахункової сітки.

5. Проведення розрахунку та перегляд результатів.

У контактній площині, де в'язаний робочий орган із ґрунтом — на дні борозни, задається гранична умова з установленим чисельним значенням тиску підпору, що розраховується за такими виразами (6-10).

За схемою (рис. 1) визначається сила підпору — вертикальна складова реакції ґрунту [Вигодський, 1962].

Умова рівноваги $\sum F_x = 0$, $\sum F_y = 0$ ґрунтового пласта становить:

$$R(\cos(\alpha) + \operatorname{tg} \delta \sin(\alpha)) - G - C \sin(\beta) - K \sin(\beta) + D \cos(\beta + \gamma) = 0 \quad (6)$$

$$R(\sin(\alpha) + \operatorname{tg} \delta \cos(\alpha)) - C \cos(\beta) - K \cos(\beta) - D \sin(\beta + \gamma) = 0 \quad (7)$$

де R — реакція робочого органу на ґрунт, Н;

G — вага ґрунтового пласту, що діє на робочий орган, Н;

C — сила когезії, Н;

K — інерція ґрунту, Н;

D — реакція ґрунту, Н;

α — кут атаки робочого органу, рад.;

$\operatorname{tg} \delta$ — тангенс кута тертя ґрунту по робочому органу;

β — кут сколу ґрунту, рад.;

γ — кут внутрішнього тертя, рад.

Після взаємних підстановок отримуємо вираз для визначення реакції ґрунту:

$$D = \frac{G + C \sin(\beta) + I \sin(\beta) - \frac{(C \cos(\beta) + I \cos(\beta))(\cos(\alpha) + \operatorname{tg} \delta \sin(\alpha))}{\sin(\alpha) + \operatorname{tg} \delta \cos(\alpha)}}{\frac{\sin(\beta + \gamma)(\cos(\alpha) + \operatorname{tg} \delta \sin(\alpha))}{\sin(\alpha) + \operatorname{tg} \delta \cos(\alpha)} - \cos(\beta + \gamma)} \quad (8)$$

Складові реакції ґрунту: силу тягового опору T та силу підпору P визначимо з таких рівнянь:

$$T = D \sin(45^\circ + 0.5\gamma) \quad (9)$$

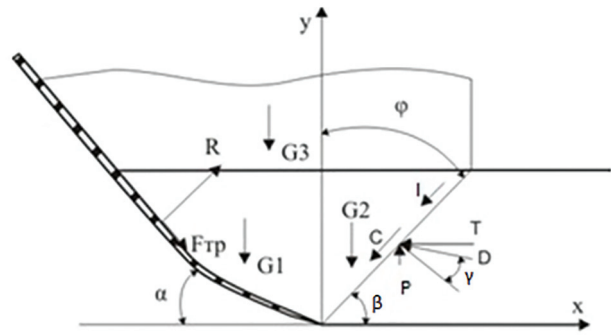


Рисунок 1 — Схема визначення сил, що діють на ґрунтовий пласт

$$P = D \cos(45^\circ + 0.5\gamma) \quad (10)$$

Результати. «Comsol» використовує адаптивну локально подрібнену сітку для розв'язування рівнянь математичної моделі. За замовчуванням він будує трикутну та тетраедричну сітку відповідно, однак є можливість задання параметрів сітки, типу кінцевих елементів і способу розбиття на кінцеві елементи.

Результати моделювання знаходяться у вузлі «Results». На рис. 2, 3 представлені карта поля швидкостей модельованого ґрунту та ізоповерхня зміни тиску.

На рисунку 2 графічно відображена диференціація швидкості руху змодельованого ґрунтового середовища, що дає змогу стверджувати про інтенсивність перемішування ґрунту в зоні впливу робочого органу. Як видно з рисунку 3, робочий орган, впливаючи на ґрунт, створює певний тиск у площині контакту «ґрунт-робочий орган», інтегральний показник якого, приведений до величини контактної площі, буде визначати тягові характеристики і саму силу тягового опору.

Для перевірки адекватності імітаційної моделі проведено польові дослідження з визначення тягового опору експериментального зразка лапового сошника з робочою шириною 410 мм для глибин ходу 4 та 8 см на змінних швидкостях руху 1,07 та 2,07 м/с. Умови випробувань були такими: дослідна ділянка фрезерована восени, поверхня поля вирівняна без рослинних решток, вологість ґрунту в посівному шарі — 24,9%, щільність ґрунту в посівному шарі — 1360 кг/м³, середня довжина ро-

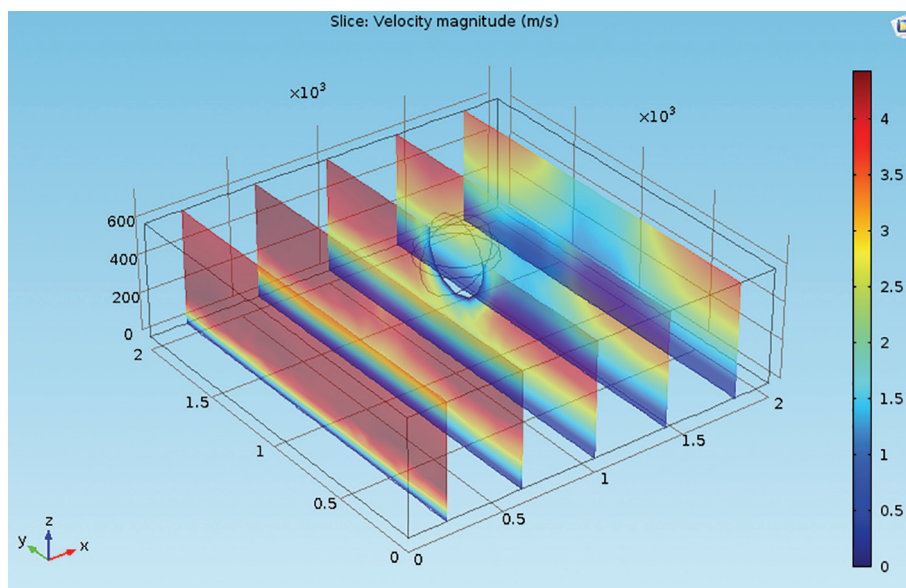


Рисунок 2 – Карта поля швидкості модельованого ґрунту при контакті з робочим органом

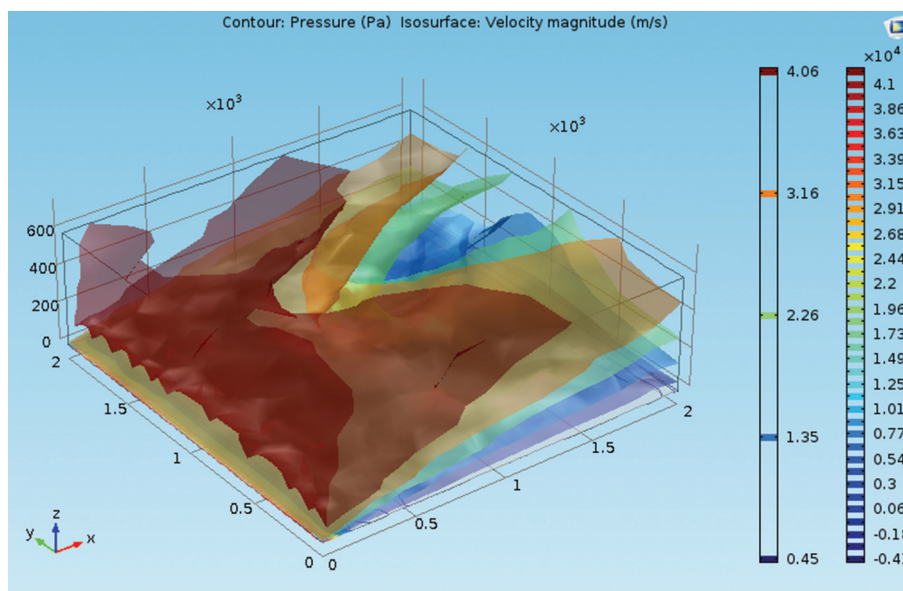


Рисунок 3 – Ізоповверхня зміни тиску у ґрунті при контакті з робочими органами

бочого ходу – 65 м. Дослідження виконано у трикратній повторності. Визначено, що середнє значення тягового опору для глибини ходу 4 см та швидкості руху 1,07 м/с становить 290 Н; для 4 см та 2,07 м/с – 500 Н, для 8 см та 1,07 м/с – 400 Н, для 8 см та 2,07 м/с – 850 Н (рис. 4, а).

Отримані експериментальні дані щодо тягового опору лапового робочого органу порівняно з даними, отриманими теоретичним способом (рис. 4, б) з використанням чисельного імітаційного моделювання у програмному комплексі «Comsol» (рис. 2, б). За проведеною статистич-

ною оцінкою даних досліджень щодо тягового опору лапового сошника встановлено, що за критерієм Фішера при встановленому рівні значимості $\alpha = 0,05$ модель є статистично надійною $F(4,881) > F_{\text{табл}}(4,17)$.

Обговорення. Симуляція поведінки ґрунту є досить нетривіальним завданням. У програмному середовищі «Comsol» при наявності базового функціоналу комп'ютерної імітації різних моделей ґрунту немає можливості моделювати динаміку процесу його руйнування робочим органом у агротехнологічному рядку [Shi et al., 2022]. Розроблений підхід дає змогу адаптувати рівняння Нав'є-Стокса до вирішення проблем землеробської механіки. Отримані рівняння статистики з урахуванням сил і моментів впливу кута атаки робочого органу на силу і момент реакції ґрунту дають змогу визначити силу підпору у розроблений методиці. Похибка моделю-

вання функціонування ґрунтообробних робочих органів у модельованому ґрунтовому середовищі знаходиться в межах допустимого рівня. Розроблений метод забезпечить підвищення рівня ефективності вдосконалення та оцінки новітніх розробок і дасть змогу порівнювати аналогії з прототипами, а для його реалізації розроблені покрокові рекомендації щодо використання «COMSOL» у моделюванні реології ґрунту.

Висновки. Розроблено методику цифровізації ґрунтового середовища, що дає змогу у програмі «COMSOL» відтворити

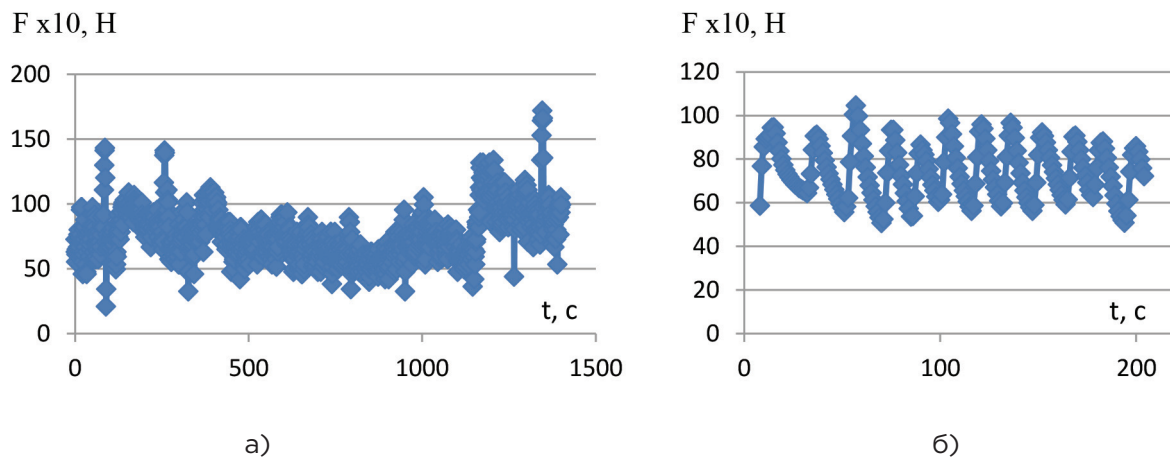


Рисунок 4 – Діаграми тягового опору лапового сошника, отримані експериментально (а) та моделюванням (б) при швидкості руху 2,07 м/с з глибиною ходу 8 см

його реологію та організувати вирішення складного питання землеробської механіки — моделювання напружено-деформованого стану ґрунту. Імітаційна модель розробленого методу моделювання ідентифіковано за критерієм Фішера та є статистично надійною.

Економічний ефект забезпечується скороченням трудомісткості та ресурсоемності робіт, втрат часу та рівністю умов випробувань для всіх досліджуваних технічних засобів. Практична значимість розробки полягає в адаптації автоматизованої системи з модулем моделювання рідинних течій до потреб землеробської механіки.

Перелік літератури

Бурачек І. В., Михайленко Н. В. (2018). Сучасний стан та перспективні напрями розвитку сільського господарства в Україні. Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського. Випуск 21. С. 134-137. URL: <http://global-national.in.ua/archive/21-2018/27.pdf>

Вигодський М.Я. (1962) Довідник з вищої математики. М.: В-71.

Доспехов Б.А. (1985) Методика полевого опыта. — М.: Агропромиздат, 351 с.

Кушнарєв А.С. (1989) Механико-технологические основы обработки почвы / Кушнарєв А.С. Кочев В.И. — Киев: Урожай, 144 с.

Ладиженська О. А. (1970) Математичні питання динаміки в'язання незбираної рідини. — М.: Наука.

Лупенко Ю.О., Месель-Веселяк В.Я. (ред.) (2012). Стратегічні напрями розвитку сільського господарства України на період до 2020 року. Київ : ННЦ ІАЕ, 2012. 218 с. URL: https://www.old.nas.gov.ua/siaz/Ways_of_development_of_Ukrainian_science/article/12064.017.pdf.

Месель-Веселяк В. Я., Федоров М. М. (2016). Стратегічні напрями розвитку аграрного сектору економіки України. Економіка АПК, (6), 37-49.

Темам Р. Порівняння Нав'є-Стокса. Теорія та множинний аналіз. Пер. с англ., 1981. — 480 с.

Introduction to COMSOL Multiphysics. — COMSOL, 2015. — 179 с. URL: <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.

Koon, R. K., & Haraksingh, I. (2013). Preliminary Analytical Solutions of the Geomechanical and Thermal Stresses on Fracture Walls. In the Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGA-standard/SGW/2013/Koonkoon.pdf>.

Nabatov, V. V., & Voznesenskii, A. S. (2023). Geomechanical analysis of the impact of the new tunnels construction in the vicinity of existing underground subway structures on the state of the soil massif. Journal of Mining Institute, 264, 926-936. Retrieved from <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15639>.

Shen, W., Ma, T., Li, X., Sun, B., Hu, Y., & Xu, J. (2022). Fully coupled modeling of two-phase fluid flow and geomechanics in ultra-deep natural gas reservoirs. *Physics of Fluids*, 34(4). <https://doi.org/10.1063/5.0084975>.

Shi, Y., Rui, S., Xu, S., Wang, N., & Wang, Y. (2022). COMSOL modeling of heat transfer in SVE process. *Environments*, 9(5), 58.

Vlasenko T. (2019) Dynamics and structure of the agricultural machinery market in Ukraine: trends and prospects. *Znanstvena misel journal*. (34). 16-22. URL: <https://zm-journal.org/wp-content/uploads/2020/10/Znanstvena-misel-journal-№34-2019-Vol-2.pdf>.

Yan, H., Park, J., Fjær, E., & Holt, R. M. (2025). Analytical solution approach for geomechanical response of 3-D geological model. *Geophysical Journal International*, 240(3), 1900-1916. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaf008>.

Zhang, J., Ge, H., Meng, H., Shen, Y., Wang, X., Yang, Z., ... & Zhang, J. (2021, June). Geomechanical Modeling of Fracture-To-Well and Fracture-To-Fracture Interference Caused by Production in Shale Reservoirs. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2021). ARMA.

References

Burachek I. V., Mykhailenko N. V. (2018). Current state and promising directions of development of agriculture in Ukraine. *Mykolaiv National University named after V.O. Sukhomlynsky*. Issue 21. P. 134-137. URL: <http://global-national.in.ua/archive/21-2018/27.pdf>

Dospekhov B.A. (1985) Methodology of field experience. - M.: Agropromizdat, 351 p.

Introduction to COMSOL Multiphysics. - COMSOL, 2015. - 179 p. URL: <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>.

Koon, R. K., & Haraksingh, I. (2013). Preliminary Analytical Solutions of the Geomechanical and Thermal Stresses on Frac-

ture Walls. In *Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. URL: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGA-standard/SGW/2013/Koonkoon.pdf>.

Kushnarev A.S. (1989) Mechanical and technological foundations of soil processing / Kushnarev A.S. Kochev V.I. – Kyiv: Urozhai, 144 p.

Ladyzhenska O. A. (1970) Mathematical questions of the dynamics of the knitting of an uncollected liquid. – M.: Nauka.

Lupenko, Yu.O., Mesel-Veselyak, V.Ya. (ed.) (2012). Strategic directions of development of agriculture of Ukraine for the period up to 2020. Kyiv: NNC IAE, 2012. 218 p. URL: https://www.old.nas.gov.ua/siaz/Ways_of_development_of_Ukrainian_science/article/12064.017.pdf.

Mesel-Veselyak V. Ya., Fedorov M. M. (2016). Strategic directions of development of the agricultural sector of the economy of Ukraine. *Economics of the Agricultural Industry*, (6), 37-49.

Nabatov, V. V., & Voznesenskii, A. S. (2023). Geomechanical analysis of the impact of the new tunnel construction in the vicinity of existing subway structures on the state of the soil massif. *Journal of Mining Institute*, 264, 926-936. Retrieved from <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/15639>.

Shen, W., Ma, T., Li, X., Sun, B., Hu, Y., & Xu, J. (2022). Fully coupled modeling of two-phase fluid flow and geomechanics in ultra-deep natural gas reservoirs. *Physics of Fluids*, 34(4). <https://doi.org/10.1063/5.0084975>.

Shi, Y., Rui, S., Xu, S., Wang, N., & Wang, Y. (2022). COMSOL modeling of heat transfer in SVE process. *Environments*, 9(5), 58.

Themes R. Navier-Stokes comparison. Theory and multiple analysis. Trans. with English, 1981. - 480 p.

Vlasenko T. (2019) Dynamics and structure of the agricultural machinery market in Ukraine: trends and prospects. *Scientific thought journal*. (34). 16-22. URL: <https://zm-journal.org/wp-content/uploads/2020/10/Znanstvena-misel-journal-№34-2019-Vol-2.pdf>.

Vygodsky M.Ya. (1962) Handbook of higher mathematics. M.: B-71.

Yan, H., Park, J., Fjxr, E., & Holt, R.M. (2025). Analytical solution approach for geomechanical response of 3-D geological model. *Geophysical Journal International*, 240(3), 1900-1916. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaf008>.

Zhang, J., Ge, H., Meng, H., Shen, Y., Wang, X., Yang, Z., ... & Zhang, J. (2021, June). Geomechanical Modeling of Fracture-To-Well and Fracture-To-Fracture Interference Caused by Production in Shale Reservoirs. In *ARMA US Rock Mechanics/ Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-2021). ARMA.

UDC 33.62.001.57:651.17

SIMULATION OF SOIL ENVIRONMENT RHEOLOGY IN COMSOL

Khalin S., PhD in Economic Sciences,

<https://orcid.org/0000-0002-7510-5056>

Serbiy V., Ph.D. Tech. Sc., Senior Researcher,

<https://orcid.org/0000-0002-1503-4866>

Haidai T., Ph.D. Tech. Sc.,

<https://orcid.org/0000-0001-9141-4820>,

Mukha V.,

<https://orcid.org/0000-0001-7870-0187>

Stepchenko S., <https://orcid.org/0000-0003-2808-9644>,

Shulik A.,

L. Pogorilyy UkrNDIPVT

Summary

Aim. Increasing the efficiency of assessing the conformity and functioning of tillage machines by substituting a physical model with computer modeling.

Methods. Analysis, analytical, experimental. Results. An automated system for modeling liquid flows has been adapted to the needs of agricultural mechanics. Namely, the Comsol software package for simulating the properties of the soil environment, which makes it possible to simulate its stress-strain state under the influence of a working body of any given configuration and obtain traction and energy indicators, which can serve as an evidence base for comparing prototypes with analogues.

To check the adequacy of the simulation model, field studies were carried out to determine the traction resistance of an experimental sample of a tine opener with a working width of 410 mm for stroke depths of 4 and 8 cm at variable speeds of 1.07 and 2.07 m/s.

The obtained experimental data regarding the traction resistance of the paw working body were compared with the theoretically obtained data using numerical simulation in the Comsol software package. According to the statistical assessment of data from studies of the traction resistance of the tine opener, it was established that, according to the Fisher criterion, at the established level of significance $\alpha = 0,05$ the model is statistically reliable $F > F_{табл}$.

Conclusions. A validated method of soil environment simulation has been developed to obtain traction and energy performance indicators of soil working bodies. The simulation model of the developed modeling method has been identified by the Fisher criterion and is statistically reliable. The economic effect is ensured by reducing the labor intensity and resource intensity of work, time loss, and equality of test conditions for all studied technical means.

Keywords: Soil environment, model, simulation, imitation, working bodies, Comsol.