

ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВЗАЄМОДІЇ ПОВЕРХНІ ГЛАДКОГО КОТКА З ҐРУНТОМ

¹Полтавська державна аграрна академія

Розглянуто особливості застосування методу скінченних елементів для дослідження класичного приклада кочення гладкого котка по горизонтальній деформованій поверхні. Розв'язок контактної задачі дозволив уточнити раціональні конструкційні параметри котка та детально розглянути його взаємодію з ґрунтом.

Ключові слова: кочення, ґрунтообробний коток, ущільнення ґрунту, закриття вологи, контактна задача кочення.

Вступ

Вагомий науковий внесок в теорію обробітку ґрунту зробили В. П. Горячкін, І. М. Панов, Г. Н. Синеоков, Л. В. Погорілий, А. С. Кушнар'єв, О. В. Верняєв, В. І. Кравчук, В. О. Дубровін, Д. Г. Войтюк, Я. С. Гуков, В. М. Сало, Н. И. Кленин та ін. В роботах цих вчених розглянуто також дослідження проблем механізованого обробітку ґрунту. Показано, що удосконалення обробітку ґрунту доцільно проводити за рахунок зменшення енергетичних, економічних та трудових затрат та максимального збереження природної макроструктури. Особливої уваги потребує передпосівний обробіток, зокрема процес ущільнення, що окрім забезпечення необхідних умов для проростання насіння, має утримувати вологу. При цьому важливим є зменшення руйнування структури ґрунту та збереження його родючості. Для дослідження процесу ущільнення ґрунту обрано метод скінченних елементів, оскільки дозволяє в геометричній інтерпретації розглянути напружено-деформований стан з позиції збереження структури ґрунту та зменшення енергетичних затрат на обробіток.

Метою статті є підвищення ефективності обробітку ґрунту та покращення агротехнічних показників технологічної операції ущільнення за рахунок обґрунтування та узгодження конструкційних і технологічних параметрів процесу шляхом дослідження зони контакту.

Результати дослідження

Відома класична теорія руху котка по горизонтальній деформованій поверхні [1] не повною мірою розкриває сутність процесів під час ущільнення ґрунту. Одним із перспективних напрямків аналізу процесу ущільнення є розв'язання задачі методом скінченних елементів [2, 3]. Нехай коток рухається по поверхні ґрунту з утворенням колії (рис. 1). Реакція ґрунту складається з елементарних сил, значення яких за відносно малих значень, пропорційні лінійній деформації ґрунту.

Дія робочої частини котка на ґрунт описується законом занурення жорсткого циліндра в пружно-пластичне середовище. Для спрощення розрахунків розглянемо лише зону контакту поверхні котка з ґрунтом (рис. 2).

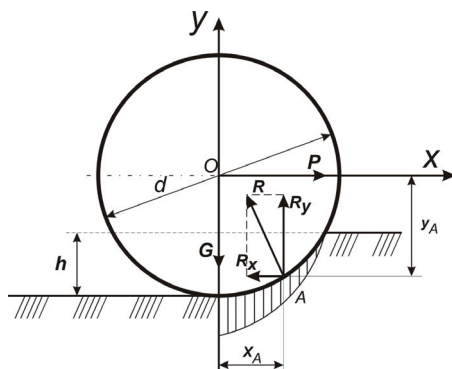


Рис. 1. Схема руху гладкого циліндричного котка по поверхні деформованого ґрунту

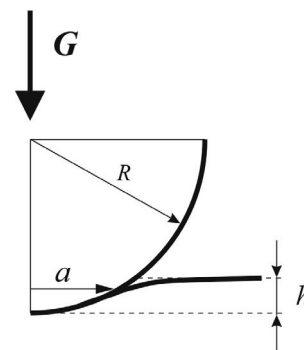


Рис. 2. Схема області контакту, що утворюється під час руху гладкого циліндричного котка по поверхні деформованого ґрунту

Для дослідження технологічного процесу ущільнення встановимо діапазон допустимих значень конструкційних та технологічних параметрів котка, взявши за основу результати розрахунків глибини колії в діапазоні 0,025...0,075 м. Для спрощення розрахунків вважатимемо довжину котка $b = 0,5$ м. Циліндр з радіусом R занурюється в пружний напівпростір на глибину d , утворюючи область контакту радіуса a (див. рис. 2). Для визначення напруженого стану ґрунту під дією поверхні розглянемо плоску статичну задачу контактної взаємодії поверхні котка з пружним напівсередовищем, вважаючи ґрунт ізотропним середовищем з модулем пружності 0,25...0,75 МПа [4].

Контактна задача взаємодії ґрунтообробного котка з ґрунтом повністю описує процес ущільнення поверхневого шару ґрунту.

$$a = \sqrt{R \cdot h}; \quad (1)$$

$$G = \frac{4}{3} E R^{\frac{1}{2}} d^{\frac{3}{2}}; \quad (2)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}; \quad (3)$$

$$p = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (4)$$

$$p_0 = \frac{2}{\pi} E \left(\frac{d}{R} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (5)$$

$$\sigma_{\max} = 0,3883 \sqrt[3]{G E^2 \frac{1}{R^2}}; \quad (6)$$

де G — вага котка, Н; E_1 і E_2 — модулі пружності матеріалу котка та ґрунту, відповідно, МПа; ν_1 і ν_2 — коефіцієнти Пуассона відповідних тіл; R — радіус котка, м; P_0 — розподілений тиск по площі контакту, МПа; σ_{\max} — найбільше напруження, МПа.

Скориставшись методикою [3], розв'яжемо задачу та встановимо оптимальні параметри процесу. У першому наближенні межа пружності і зона пластичності мала і повністю охоплюється матеріалом, що знаходяться в пружному стані, таким чином пластичні деформації мають однакові значення з пружними деформаціями. Витіснення ґрунту котком компенсується пружними зміщеннями навколишнього середовища. Під дією котка в ґрунті виникають напруження, які з одного боку залежать від конструктивних параметрів котка, його маси та швидкості, з якою він рухається, з іншого — від фізико-механічних властивостей певного типу ґрунту, які виражаються в деформації шару, до якого прикладене навантаження. Модель контактної взаємодії пари «коток—ґрунт» показана на рис. 3, 4.

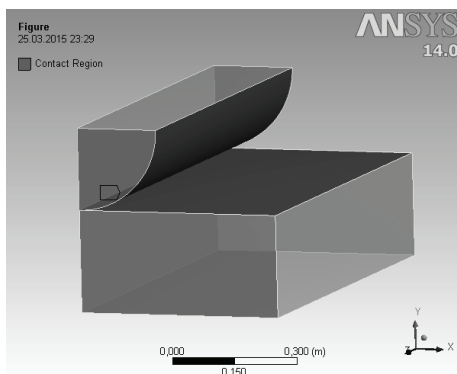


Рис. 3 Схема контактної (CONTA 174) та контактуючої (TARGE 170) поверхонь ґрунту та котка

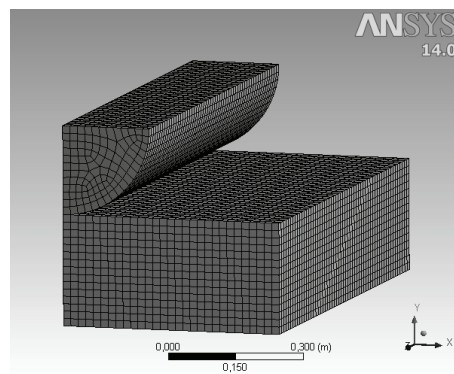


Рис. 4 Схема сітки скінченних елементів (всього 137139 вузлів)

Для дослідження конструкційних та технологічних параметрів ущільнення обрані такі показники:

1. Пружна деформація (Equivalent Elastic Strain), $\lambda_{\text{П}}$, м/м;

2. Енергія деформації (Strain Energy) J_d , Дж;
3. Загальна деформація (Total Deformation), λ , м;
4. Головні напруження (Principal Stress), σ_r , Па;
5. Інтенсивність напружень (Stress Intensity), σ_i , Па.

В результаті розрахунків за методикою [3], отримано вказані діапазони значень досліджуваних параметрів ущільнення d в геометричній інтерпретації (рис. 5—8). У зв'язку з високою неоднорідністю фізико-механічних характеристик ґрунту процес ущільнення доцільно розглядати як теоретичне дослідження впливу котків з різними конструкційними параметрами на змінні фізико-механічні параметри ґрунту.

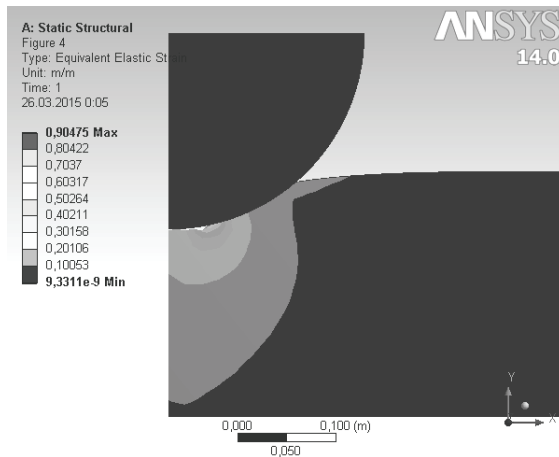


Рис. 5. Схема результатів розрахунку пружної деформації $\lambda_{\text{П}}$

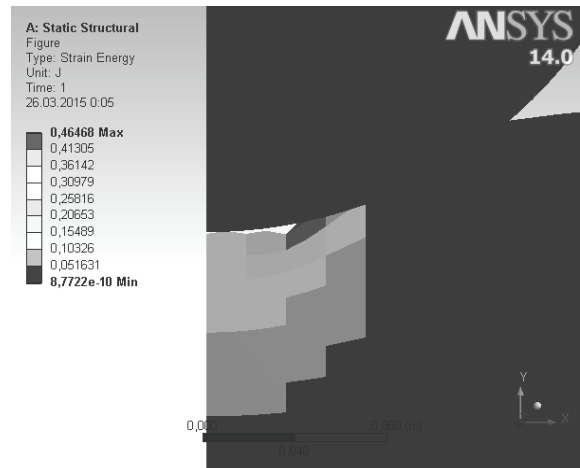


Рис. 6. Схема результатів розрахунку енергії деформації J_d в місці контакту

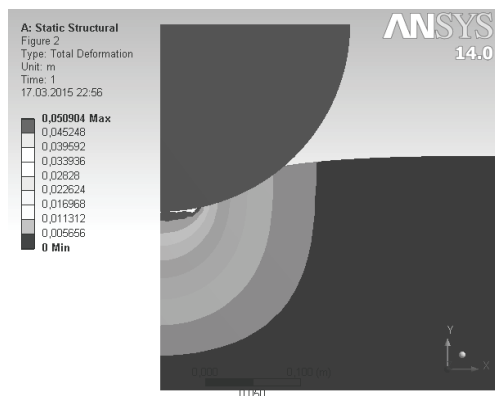


Рис. 7. Схема результатів розрахунку загальної деформації λ

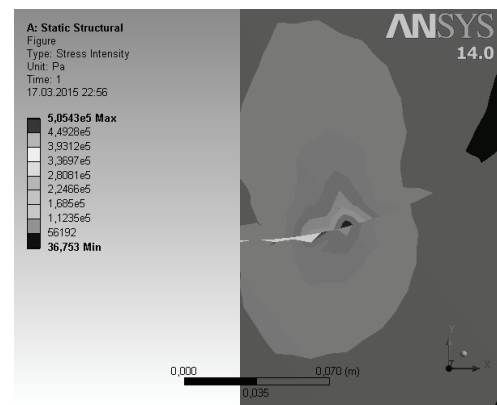


Рис. 8. Схема результатів розрахунку інтенсивності напружень σ_i

Теоретична залежність сили від глибини ущільнення $p(x)$ виражається параболою, тобто:

$$p(x) = k\sqrt{a^2 - x^2}, \quad (7)$$

де k — коефіцієнт напруження, що розраховується за формулою, Н/м²

$$k = \frac{2G}{\pi a^2}; \quad (8)$$

x — координати точки, м; a — ширина контакту, розраховується за формулою, м

$$a = 1,522\sqrt{\frac{GR}{E_2}}. \quad (9)$$

Максимальне напруження p_0 в центрі контакту виражається як

$$p_0 = 0,418 \sqrt{\frac{GE_2}{R}}. \quad (10)$$

Довжина контакту відносно велика (див. рис. 5) і складає 22,4 мм, таким чином максимальне напруження в точці контакту складає 16,5 КПа; $k = 0,039 \text{ Н/мм}^2$. Кількість вузлів, що охоплюються зоною контакту, складає 18. Загальна кількість вузлів 137139.

Глибина ущільнення може збільшуватись або за рахунок збільшення навантаження, або за рахунок зменшення кута входження при вершині циліндричної поверхні котка. Для забезпечення необхідного ущільнення та розширення ґрунту потрібно підвищення тиску під котком.

Для зменшення кількості обчислень та швидкого отримання діапазону оптимальних значень скористаємось методикою побудови поверхні відгуку [5]. Значення та межі досліджуваних факторів подано в табл. 1.

Таблиця 1

Значення факторів та діапазони значень числового дослідження

D_{\min} , м	D , м	D_{\max} , м	h_{\min} , м	h , м	h_{\max} , м	σ_{\min} , МПа	σ , МПа	σ_{\max} , МПа
0,2	0,4	0,6	0,025	0,05	0,075	0,25	0,5	0,75

За основну залежну змінну в результатах теоретичних досліджень, розглянемо радіус котка (R). Визначивши адекватність моделі, спочатку розглянемо факторний план 2^2 з подальшим переходом до 2^3 (табл. 2, рис. 11—16).

Таблиця 2

Результати розрахунків деяких показників ущільнення методом скінченних елементів

№	Радіус R , м	Модуль пружності ґрунту E_2 , Па	Загальна деформація λ , м	Максимальна енергія $J_{d \max}$, Дж	Енергія деформації J_d , м/м	Головні напруження σ_r , Па	Інтенсивність напружень σ_r , Па
1	0,20	500000	0,051	0,46	0,90	243952	505432
2	0,20	500000	0,076	1,05	1,36	365928	758148
3	0,20	500000	0,025	0,12	0,45	121976	252716
4	0,10	500000	0,051	0,42	1,01	154916	615272
5	0,30	500000	0,051	0,36	0,90	184411	623595
6	0,20	200000	0,051	0,19	0,90	97581	202176
7	0,20	800000	0,051	0,74	0,90	390321	808691
8	0,12	256090	0,072	0,45	1,45	112379	471157
9	0,12	256090	0,031	0,08	0,61	47419	198806
10	0,28	256090	0,072	0,48	1,37	142150	479339
11	0,28	256090	0,031	0,09	0,58	59981	202258
12	0,12	743910	0,072	1,32	1,45	324845	1379181
13	0,12	743910	0,031	0,24	0,61	137069	581949
14	0,28	743910	0,072	1,40	1,37	407718	1384335
15	0,28	743910	0,031	0,25	0,58	172038	584123
16	0,20	500000	0,051	0,46	0,90	243952	505432

Для встановлення допустимого тиску гладкого котка на ґрунт вихідною умовою доцільно вважати базову глибину ущільнення і на основі геометричних характеристик досліджувати механічні та енергетичні параметри ущільнення.

Висновки

Результати розрахунків контактних напружень для діапазону конструкційних параметрів дозволяє зробити висновок про ефективність ущільнення шару ґрунту товщиною 0...10 см. Встановлено, що зі збільшенням глибини ущільнення до 6...8 см вплив діаметра на головні напруження ущільнення збільшується, про що свідчить крутизна характеристики (рис. 11) На всі інші досліджувані показники ґрунту зміна діаметра суттєво не впливає. Значно змінюються (10...15 %) лише пружні деформації та головні напруження (10...12 %), що в свою чергу значно впливає на структурні фізико-механічні властивості ґрунту (рис. 12—14).

Проаналізувавши отримані поверхні, побудуємо графік оптимальних значень напружень ущільнення для гладкого циліндричного котка діаметром $D = 0,4$ м з масою 80 кг (рис. 15).

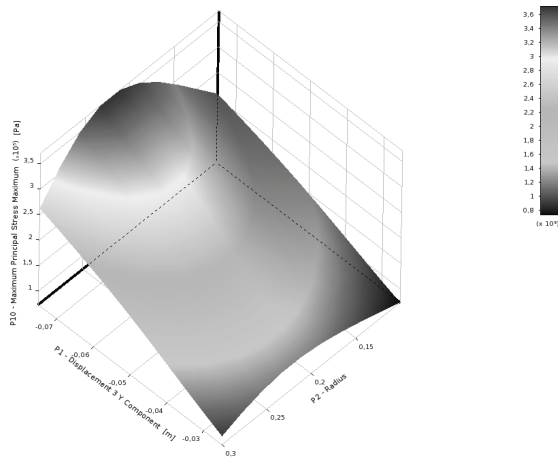


Рис. 11. Схема поверхні відгуку залежності головних напружень σ_1 від радіуса і глибини ущільнення

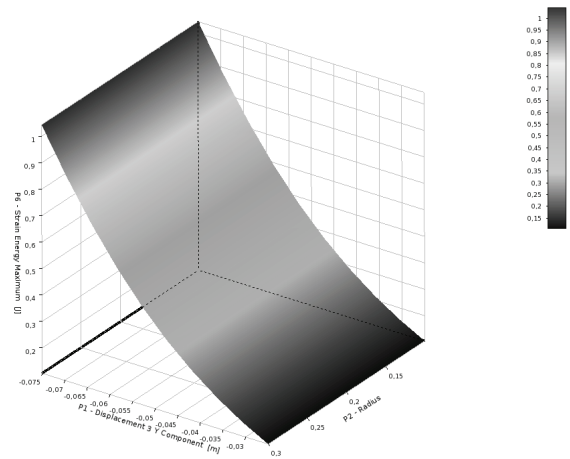


Рис. 12. Схема поверхні відгуку залежності енергії деформації J_d від радіуса і глибини ущільнення

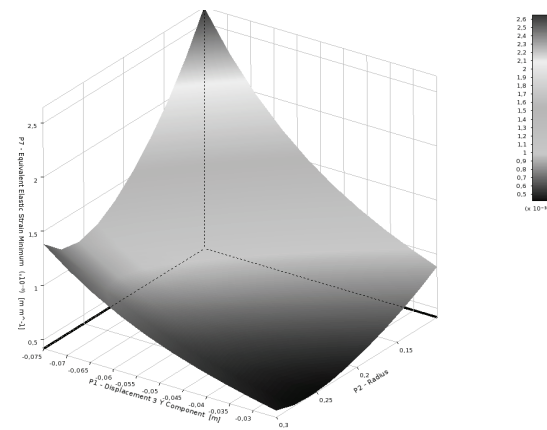


Рис. 13. Схема поверхні відгуку залежності мінімальної пружної деформації λ_{Tmin} від радіуса і глибини ущільнення

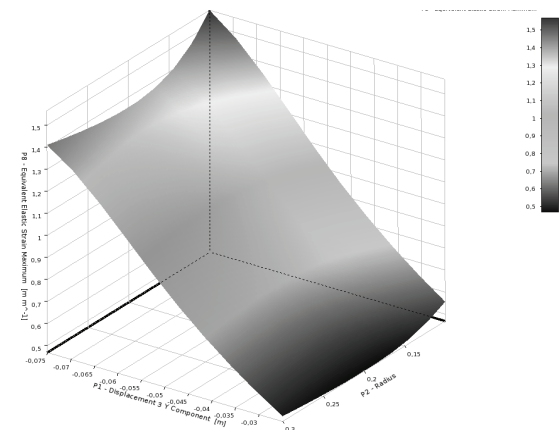
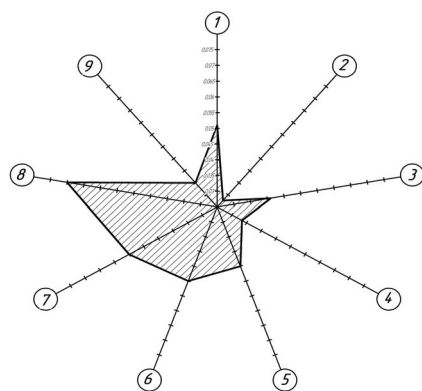


Рис. 14. Схема поверхні відгуку залежності максимальних пружних деформацій λ_{Tmax} від радіуса і глибини ущільнення

Оскільки ущільнення поверхневого шару приводить до зменшення міжпорової відстані між мікрочастинками ґрунту, то це ускладнює проходження води в його поверхневому шарі, а отже затримки води, яка необхідна для росту і розвитку сільськогосподарських культур. Параметри процесу випаровування води потребують подальшого дослідження з позиції підвищення урожайності сільськогосподарських культур.



1. Загальна деформація (Total Deformation), λ м;
2. Мінімальна енергія деформації (Strain Energy) J_{min} Дж 10^{-3} ;
3. Максимальна енергія деформації (Strain Energy) J_{max} ;
4. Мінімальна пружна деформація (Equivalent Elastic Strain), λ_{Tmin} м/м 10^{-3} ;
5. Максимальна пружна деформація (Equivalent Elastic Strain), λ_{Tmax} м/м 10^{-3} ;
6. Головні напруження (Principal Stress), σ_1 , Па 10^{-3} ;
7. Деформація по вісі X, (Directional deformation) м 10^{-1} ;
8. Максимальна інтенсивність напружень (Stress Intensity), σ_{1max} , Па 10^3 ;
9. Мінімальна інтенсивність напружень (Stress Intensity), σ_{1min} , Па;

Рис. 15. Зведений графік раціональних параметрів ущільнення

Згідно з розрахунками найраціональніший діапазон конструкційних параметрів гладкого ґрунтообробного котка слід утримувати в межах: діаметр $D = 0,4 \dots 0,5$ м, навантаження на ґрунт $G = 550 \dots 700$ Н.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кленин, Н. И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н. И. Кленин, В. А. Саун. — М. : Колос, 1980. — 671 с.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. — М. : Мир, 1989. — 510 с.
3. Nakasone Y. Engineering Analysis With ANSYS Software / Y. Nakasone, S. Yoshimoto. Elsevier Butterworth-Heinemann. Linacre House. Jordan Hill. Oxford OX2 8DP. 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803, 2006. — 473 p.
4. Бендера І. М. Проектування сільськогосподарських машин / за ред. І. М. Бендери. — Кам'янець-Подільський : Абетка, 2011, 640 с.
5. Боровиков В. П. Учебник по математической статистике с упражнениями в системе STATISTICA / В. П. Боровиков, Г. И. Ивченко. — М. : StatSoft, 2003.

Рекомендована кафедрою промислового та цивільного будівництва ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 29.05.2015

Іванюта Михайло Васильович — канд. техн. наук, старший викладач кафедри машин та обладнання агропромислового виробництва, e-mail: ur6hdc@gmail.com.

Полтавська державна аграрна академія, Полтава

M. V. Ivaniuta¹

Numerical research of interacting process of surface of smooth combine with soil

¹Poltava State Agricultural Academy

The features of application of method of eventual elements are considered for the research of the classic example of rolling of smooth combine on the horizontal deformed surface. The decision of pin task allowed setting the rational construction and technological parameters of process of compression of soil.

Keywords: moving, cultivation rowing, condensing soil, closed moisture, contact problem of moving.

Ivaniuta Mykhailo V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Machine and Equipment Agricultural Production, e-mail: ur6hdc@gmail.com

М. В. Иванюта¹

Численное исследование процесса взаимодействия поверхности гладкого катка с грунтом

¹Полтавская государственная аграрная академия

Рассмотрены особенности применения метода конечных элементов для исследования классического примера качения гладкого катка по горизонтальной деформированной поверхности. Решение контактной задачи позволяет уточнить рациональные конструкционные параметры катка и детально рассмотреть его взаимодействие с грунтом.

Ключевые слова: качение, почвообрабатывающий каток, уплотнение почвы, закрытие влаги, контактная задача качения.

Иванюта Михаил Васильевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры машин и оборудования агропромышленного производства, e-mail: ur6hdc@gmail.com