

THE VERIFICATION OF MATHEMATICAL MODELS DESIGNED TO DETERMINING THE AREA OF THE CONTACT SURFACE AS WELL AS UNIT PRESSURE EXERTED ONTO SOIL BY WHEELS OF THE AGRICULTURAL VEHICLES

Summary

The paper presents the comparison of the values of the area of contact surface and unit pressure of exerted onto soil by wheels of agricultural vehicles, calculated with the help of some chosen mathematical models, with results of experimental investigations. The conducted analyses showed the agreement of majority of mathematical models with results of executed investigations. In the case of some models essential differences in relation to results obtained in field investigations were identified.

WERYFIKACJA MODELI MATEMATYCZNYCH PRZEZNACZONYCH DO WYZNACZANIA POŁA POWIERZCHNI STYKU ORAZ NACISKÓW JEDNOSTKOWYCH KÓŁ POJAZDÓW ROLNICZYCH NA GLEBĘ

Streszczenie

W niniejszej pracy porównano wyniki obliczeń uzyskanych w oparciu o wybrane modele matematyczne przeznaczone do wyznaczania pola powierzchni styku oraz nacisków jednostkowych kół pojazdów rolniczych na glebę z wynikami badań eksperymentalnych. Przeprowadzone analizy wykazały zgodność większości modeli matematycznych z wynikami wykonanych badań. W przypadku niektórych modeli stwierdzono istotne różnice w stosunku do rezultatów uzyskanych w badaniach polowych.

1. Wstęp

Naprężenie graniczne jest jednym z ważniejszych kryteriów oceny wytrzymałości gleby na obciążenie wywierane przez pojazdy rolnicze. Jest ono definiowane jako naprężenie o takiej wartości, powyżej której dalsze zwiększanie obciążenia powoduje nieproporcjonalnie duże zmniejszanie objętości gleby. Jednocześnie następuje znaczny przyrost gęstości objętościowej gleby. Wartość naprężenia granicznego wyznaczana jest na podstawie zależności pionowej deformacji gleby od nacisku jednostkowego. Na podstawie wyznaczonej wartości może być ustalony dopuszczalny nacisk jednostkowy kół pojazdów rolniczych na glebę [5, 6]. Nacisk jednostkowy koła pojazdu nie jest we wszystkich strefach powierzchni styku z glebą jednakowy. Na ogół, ze względu na łatwość oznaczenia, wyznacza się jego średnią wartość, którą następnie porównuje się z oszacowanym naprężeniem granicznym.

Wartość nacisku jednostkowego jest wyznaczana na podstawie obciążenia koła i pola powierzchni styku koła z glebą. Opracowano szereg modeli matematycznych, które pozwalają obliczyć pole powierzchni styku w oparciu o dane dotyczące wymiarów opony i ewentualnie ciśnienia panującego wewnątrz ogumienia oraz obciążenia koła. Wiele z tych modeli można łatwo wykorzystać w praktyce. Są one przeznaczone do szacowania pola powierzchni styku ogumienia z glebą o różnej podatności na zagęszczenie. Do oceny tej podatności przyjęto wskaźnik głębokości koleiny (W_z) będący ilorazem maksymalnej głębokości koleiny i średnicy koła [4]. Wartość wskaźnika, mieszcząca się w zakresie 0,05-0,025, oznacza średnie warunki glebowe. Wartości mniejsze od 0,025 uzyskiwane są na glebie mocno związłej, zaś większe od 0,05 – na glebie o dużej

plastyczności, przy czym wpływ na wartość wskaźnika ma także obciążenie koła.

Celem niniejszej pracy było porównanie wyników badań eksperymentalnych dotyczących pola powierzchni styku oraz nacisków jednostkowych kół na glebę z wynikami obliczeń uzyskanymi w oparciu o wybrane modele matematyczne.

2. Materiały i metody

Wszystkie badania eksperymentalne wykonano na glinie lekkiej oraz średniej. W celu uzyskania kolein o zróżnicowanych głębokościach, przygotowano trzy pola, na których stan zagęszczenia gleby był zróżnicowany następująco:

- pole po uprawie płużnej na głębokość około 25 cm i doprawianiu broną zębowa,
- pole po uprawie glebogryzarką na głębokość około 10 cm oraz wałowaniu,
- pole z glebą odleżałą, na którym rolę uprawiano 5 miesięcy wcześniej.

Do badań wykorzystano 8 ciągników o znacznie zróżnicowanych masach i ogumieniach (Fendt Favorit Sam 926, Massey Ferguson Dynas 6490, Ursus 1614, Ursus 902, Zetor 9540, Ursus 3512, Ursus C-360-3P, Ursus 1214). Wszystkie pojazdy były wyposażone w typowe ogumienie. Ciśnienie powietrza w ogumieniu kolejno ustalano na dwóch poziomach: maksymalnym, zalecanym przez producenta do prac transportowych oraz minimalnym, zalecanym do realizacji prac polowych. Ciągniki przemieszczały się po polu z prędkością około $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Do obliczania nacisków jednostkowych (NJ) wykorzystano znany wzór:

$$NJ = F \cdot S^{-1},$$

gdzie:

F - siła statycznego nacisku koła na glebę,
S - pole powierzchni styku koła z glebą.

Siłę statycznego nacisku koła na glebę obliczano na podstawie masy przypadającej na przednie bądź tylne koło ciągników. Pomiaru wykonano na legalizowanej wadze najazdowej LP 600, wyprodukowanej przez Intercomp USA. Pole powierzchni styku koła z glebą wyznaczano metodą pośrednią. Po zatrzymaniu ciągnika krawędzie powierzchni styku kół z glebą markowano poprzez natrysk białej farby. Następnie ciągnik zjeżdżał ze strefy pomiarowej, a każdy z utrwalonych śladów przykrywano przezroczystą folią, na której następnie kopiowano wcześniej wyznaczoną powierzchnię styku. Pole powierzchni zaznaczone na folii mierzono przy użyciu digitizera Genius HiSketch 1812D, współpracującego z komputerem PC. Głębokość koleiny obliczano w oparciu o dane uzyskane na podstawie jej poprzecznego profilu, odwzorowanego przy użyciu profilografu szpilkowego. Minimalna ilość powtórzeń pomiarów wyznaczano na podstawie statystycznej oceny prób wstępnych. Na podstawie wykonanych pomiarów sporządzono charakterystyki zależności nacisku jednostkowego koła od głębokości koleiny, przy stałym ciśnieniu powietrza wewnątrz ogumienia. Na podstawie uzyskanych zależności, wartość nacisku jednostkowego odpowiadającą głębokości koleiny każdego z zakresów wskaźnika głębokości koleiny (W_z) szacowano metodą interpolacji, przy czym głębokość koleiny dla $W_z=0-0,025$ oraz $W_z=0,025-0,05$ była wartością środkową zakresu, zaś dla $W_z>0,05$ przyjęto najmniejszą, skrajną wartość głębokości koleiny.

Do weryfikacji przyjęto modele, które umożliwiły obliczenie powierzchni styku bez konieczności pomiaru geometrycznych parametrów powierzchni kontaktu koła z glebą, lecz jedynie w oparciu o katalogowe wymiary opony, ciśnienie powietrza w ogumieniu oraz obciążenie koła. Modele te zamieszczono w tab. 1. Podane formuły obliczeniowe dotyczą trzech zakresów wskaźnika

głębokości koleiny. Modele opracowane przez Diserens dotyczą kół o średnicy co najmniej 130 cm lub opon osadzonych na obręczy o średnicy od 24 cali.

Na podstawie oszacowanych powierzchni styku obliczano naciski jednostkowe, które w dalszej kolejności porównywano z naciskami uzyskanymi w badaniach eksperymentalnych. W celu określenia zgodności wyników wyliczonych na podstawie modeli matematycznych i rezultatów badań eksperymentalnych dotyczących jednakowego zakresu wartości wskaźnika koleiny W_z , zastosowano test t dla prób niezależnych, przy poziomie istotności $\alpha=0,05$.

3. Wyniki i dyskusja

Dane dotyczące ogumienia oraz uzyskane wyniki pomiarów i obliczeń pól powierzchni styku kół z glebą przedstawiono w tab. 2. Ponieważ niektóre modele są przeznaczone jedynie do wybranych typów ogumienia, część rubryk w tabelach nie jest wypełniona liczbami. Przy wskaźniku głębokości koleiny $W_z<0,025$ wartości pól powierzchni styku uzyskane na podstawie pomiarów są na ogół większe od wartości uzyskanych w oparciu o modele obliczeniowe. Ponieważ McKyes oraz Inss i Kilgour nie uwzględniali w swoich modelach wpływu ciśnienia powietrza, wyliczone pola powierzchni są w części wartościami pośrednimi między wynikami badań eksperymentalnych uzyskanych przy ciśnieniach stosowanych przy realizacji prac transportowych oraz polowych. Wartości pól powierzchni uzyskane na podstawie modeli, które opracował Steiner, są zdecydowanie mniejsze od pozostałych. Szczególnie małe pola powierzchni wyliczono przy wykorzystaniu modelu przeznaczonego dla ogumienia diagonalnego.

Tab. 1. Wybrane modele matematyczne do obliczania pola powierzchni styku ogumionego koła z glebą
Table 1. Some chosen mathematical models to calculating the wheel-soil contact area

Nr modelu	$W_z=z \cdot D^{-1}$	Model matematyczny i jego autor	Przeznaczenie modelu
		Powierzchnia styku jako funkcja wymiarów opony	
1	$\leq 0,025$	$A = B \cdot D / 4$, [4]	nie zdefiniowane
2	$\leq 0,025$	$A = 0,87 \cdot B \cdot 0,31 \cdot D$, [3]	nie zdefiniowane
3	$0,025 \div 0,5$	$A = 0,34 \cdot B \cdot D$, [2]	ogumienie radialne normalnoprofilowe
4	$0,025 \div 0,5$	$A = 0,44 \cdot B \cdot D$, [2]	ogumienie radialne niskoprofilowe
5	$> 0,5$	$A = 0,5 \cdot B \cdot D$, [4]	nie zdefiniowane
		Powierzchnia styku jako funkcja wymiarów opony, ciśnienia i obciążenia koła	
6	$\leq 0,025$	$A = 100 \cdot G \cdot (1,128 + 0,665 \cdot P_i + 0,009 \cdot G - 0,004 \cdot D)^{-1}$, [1]	ogumienie diagonalne
7	$\leq 0,025$	$A = 100 \cdot G \cdot (2,667 + 0,575 \cdot P_i + 0,011 \cdot G - 0,016 \cdot D)^{-1}$, [1]	ogumienie radialne
8	$0,025 \div 0,5$	$A = 0,260 \cdot B \cdot D - 295,944 \cdot P_i + 0,556 \cdot F$, [2]	ogumienie radialne normalnoprofilowe
9	$0,025 \div 0,5$	$A = 0,416 \cdot B \cdot D - 457,670 \cdot P_i + 0,186 \cdot F$, [2]	ogumienie radialne niskoprofilowe

Znaczenie symboli: A – powierzchnia styku [cm^2], B – szerokość opony [cm], D – średnica opony [cm],
 F – obciążenie [kg], G – obciążenie [kN], P_i – ciśnienie w ogumieniu [bar], z – maksymalna głębokość koleiny [cm]

Tab. 3. Wartości nacisków jednostkowych uzyskane na podstawie modeli matematycznych i badań polowych
 Table 3. Values of unit pressure obtained on the base of mathematical models and field investigations

Rozmiar ogumienia	Ciśnienie w ogumieniu	Wartości nacisków jednostkowych [kPa]											
		McKyes (formuła 1)	Inss i Kilgour (2)	Steiner (6)	Steiner (7)	Badania polowe	Diserens (3)	Diserens (4)	Diserens (8)	Diserens (9)	Badania polowe	McKyes (5)	Badania polowe
		$W_z \leq 0,025$					$W_z = 0,025 \div 0,05$					$W_z > 0,05$	
P_i [bar]													
480/70 R34	1,8	123	114		144	92		70		85	74	62	69
	1,1	123	114		104	85		70		76	64	62	60
480/70 R28	1,6	113	105		153	106		64		79	75	57	61
	1,1	113	105		124	70		64		72	60	57	57
14,9 R 24	2,1	119	110		204	111					87	59	68
	1,1	119	110		146	94					74	59	61
ANP5 6PR7,5 20	2,6	181	168	257		162					144	91	130
	1,6	181	168	190		112					99	91	90
620/70 R42	1,7	79	73		81	88		45		51	61	40	58
	1,0	79	73		41	77		45		48	46	40	40
580/70 R38	1,5	73	67		82	77		41		47	55	36	48
	0,9	73	67		48	61		41		44	43	36	40
18,4 R34	1,7	86	80		119	91	63		69		69	43	60
	1,0	86	80		79	73	63		63		52	43	48
18,4 R 34	1,9	78	72		129	88	57		67		66	39	54
	0,8	78	72		66	68	57		58		49	39	40
12,4-24	1,7	102	94	188		93					68	51	57
	0,8	102	94	128		79					52	51	46
6,00-16	2,3	160	148	241		105					85	80	78
	1,1	160	148	161		94					73	80	66
6,00-16	2,3	148	137	240		114					90	74	80
	1,1	148	137	161		98					75	74	66
14,9-24	1,8	106	98	193		93					67	53	58
	0,8	106	98	127		81					56	53	49
16,9 R38	1,6	67	62		104	66	49		59		51	34	46
	0,6	67	62		46	61	49		51		42	34	38
12,4 R32	1,6	77	71		152	69	57		76		54	39	49
	0,6	77	71		94	60	57		60		46	39	42
14,9-28	1,8	66	61	186		71	49		67		56	33	51
	0,8	66	61	119		62	49		54		47	33	42
18,4-34	1,8	86	79	181		66	63		70		55	43	52
	0,8	86	79	115		59	63		62		43	43	40
Istotne różnice między wynikami uzyskanymi na podstawie modeli i badań polowych		tak	nie	tak	tak	—	nie	nie	tak	nie	—	nie	—

Wszystkie pola powierzchni styku, odpowiadające średnim wartościom wskaźnika koleiny ($W_z=0,025-0,05$), wyliczono na podstawie czterech kolejnych modeli opracowanych przez Diserens. Ponieważ modele te są przeznaczone dla ogumienia radialnego normalno- i niskoprofilowego o średnicy od 1,3 m, dla części opon brak jest wyników, które można porównać z wartościami pól powierzchni uzyskanymi na podstawie badań eksperymentalnych.

W przypadku relatywnie głębokich kolein ($W_z>0,05$) uzyskano największe wartości pól powierzchni styku kół pojazdów rolniczych z glebą. Wartości obliczone w oparciu

o model, który opracował McKyes, są nieco większe od rezultatów uzyskanych w badaniach polowych. Na podstawie przeprowadzonych testów statystycznych stwierdzono, że za wyjątkiem modelu opracowanego przez Steinera i przeznaczonego dla opon diagonalnych, nie występują istotne różnice pomiędzy polami powierzchni styku kół z glebą, uzyskanymi z wykorzystaniem modeli matematycznych oraz badań polowych.

W tab. 3 przedstawiono wartości nacisków jednostkowych uzyskanych na podstawie badań polowych oraz nacisków obliczonych z wykorzystaniem modeli do szacowania pola powierzchni styku kół z glebą. Dla

wskaznika głębokości koleiny mniejszego od 0,025 naciski wyliczone w oparciu o pola powierzchni oszacowane według modeli są dla poszczególnych kół w większości przypadków większe od nacisków uzyskanych na podstawie badań polowych. Zastosowany test statystyczny wykazał, że istotne różnice nie występują jedynie pomiędzy naciskami jednostkowymi obliczonymi w oparciu o model opracowany przez Inss i Kilgour a naciskami określonymi na podstawie badań polowych.

Naciski jednostkowe obliczone według modeli przeznaczonych do stosowania przy średnich głębokościach koleiny ($W_z=0,025\div 0,05$), w znacznej części odpowiadają naciskom uzyskanym na podstawie badań polowych. Spośród czterech formuł obliczeniowych zaproponowanych przez Diserens'a, jedynie wyniki uzyskane w oparciu o model uwzględniający ciśnienie powietrza w ogumieniu radialnym, istotnie różnią się od wartości uzyskanych w badaniach polowych.

Naciski jednostkowe odpowiadające koleinie o największej głębokości ($W_z>0,05$) były najmniejsze. Jedynym modelem, na podstawie którego obliczono ich wartości był autorstwa McKyes'a. Pomimo, że wartości nacisków jednostkowych obliczone przy jego wykorzystaniu były na ogół nieco mniejsze od wartości uzyskanych w badaniach polowych, zastosowany test statystyczny wykazał brak istotnych różnic między metodą matematyczną i eksperymentalną.

4. Wnioski

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań stwierdza się co następuje:

1. Przeprowadzone badania i obliczenia uzasadniają możliwość stosowania większości użytych modeli matematycznych do wyznaczania zarówno pól powierzchni styku, jak i nacisków jednostkowych kół pojazdów rolniczych oraz gleby.
2. Pola powierzchni styku kół pojazdów rolniczych z

glebą, obliczone w oparciu o modele matematyczne, na ogół odpowiadają wartościom uzyskanym na podstawie badań eksperymentalnych – istotne statystycznie różnice uzyskano jedynie w przypadku modelu przeznaczanego dla ogumienia diagonalnego.

3. Brak istotnych różnic pomiędzy naciskami jednostkowymi, wyznaczonymi na podstawie modeli matematycznych i badań eksperymentalnych uzyskano w przypadku formuł autorstwa Inss i Kilgour (wskaznik głębokości koleiny $W_z<0,025$), trzech formuł Diserens ($W_z=0,025-0,05$), oraz McKyes'a ($W_z>0,05$).

5. Literatura

- [1] Steiner M.: Analyse, Synthese und Berechnungsmethoden der Triebkraft-Schlupf-Kurve von Luftreifen auf nachgiebigem Boden. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG). 33. Dissertation, München 1979.
- [2] Diserens E.: Ermittlung der Reifen-Kontaktfläche im Feld mittels Rechenmodell. FAT Berichte 2002, Nr. 582.
- [3] Inss F. M., Kilgour J.: Agricultural Tyres. London 1978. Dunlop, 69.
- [4] McKyes E.: Soil Cutting and Tillage. Elsevier. Amsterdam, Netherlands, Developments in Agricultural Science 1985, 7, 217.
- [5] Semmel H.: Auswirkungen kontrollierter Bodenbelastungen auf das Druckfortpflanzungsverhalten und physikalisch-mechanische Kenngrößen von Ackerböden. Dissertation, Schriftenreihe des Inst. f. Pflanzenem. u. Bodenk. der CAU zu Kiel 1993, Bd. 26.
- [6] Lebert M.: Beurteilung und Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Ackerböden. Dissertation 1989, Universität Bayreuther Bodenkundl. Berichte 12.

Jan Jurga
Akademia Rolnicza
Zakład Budowy i Użytkowania Urządzeń Technicznych
71-459 Szczecin
ul. Papieża Pawła VI nr 3

jan.jurga@agro.ar.szczecin.pl

tel. 091-4250-247, 0601-70-52-94