

Zbigniew Błaszkiwicz, Artur Szafarz  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Akademia Rolnicza w Poznaniu

## MODEL DO WYZNACZANIA OPORU TOCZENIA WYNIKAJĄCEGO Z UGIĘCIA OPON NA GLEBIE

### Streszczenie

W pracy przedstawiono nowy model do określania oporu toczenia koła powodowanego ugięciem opony podczas ruchu na glebie. Obliczeń oporu toczenia dokonano na podstawie wyników badań polowych i laboratoryjnych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że obliczone wartości oporu toczenia opon wynikające z ich ugięcia stanowią 3 do 4 % ogólnej wartości oporu toczenia.

**Słowa kluczowe:** model, ugięcie opony w glebie, opór toczenia opon

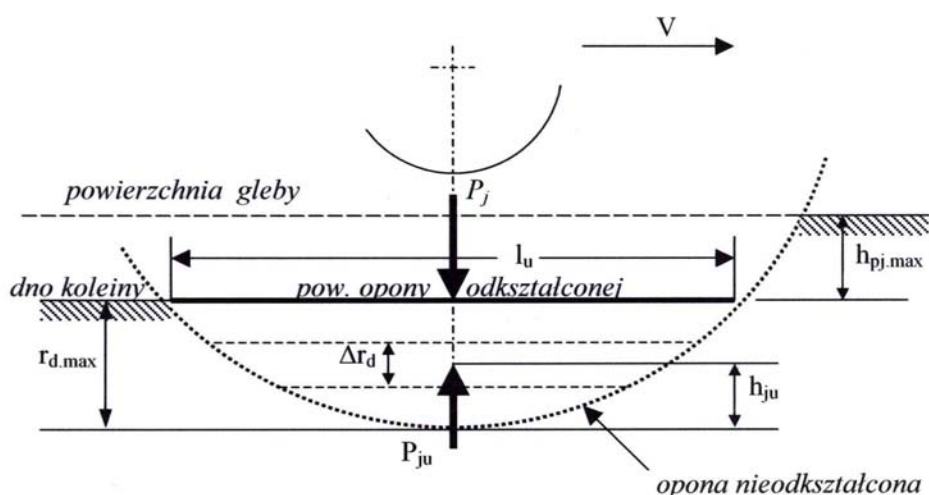
### Wstęp

Opór toczenia kół pojazdów stanowi znaczący składnik energii traconej na pokonanie oporów ruchu podczas wykonywania prac polowych na miękkich podłożach glebowych, zwłaszcza na spulchnionych glebach lekkich [Bekker 1969; Wong 2001; Szafarz i Błaszkiwicz 2005]. Opór toczenia jest rezultatem pokonywania oporu odkształcenia pionowego i poziomego gleby oraz odkształcenia opon w glebie. Jak wynika z literatury większość modeli do jego wyznaczenia uwzględnia głównie pierwszy składnik oporu toczenia pomijając inne, w tym także siłę oporu toczenia wynikającą z odkształcenia opony w glebie, która jak powszechnie podaje się może być od 10 do 100 razy mniejsza niż siła oporu powodowana odkształceniem się elastycznego podłoża [Société de Technologie Michelin 2003]. Przyjmując, że ta część oporu toczenia w glebie może wynosić maksymalną wartość 10%, to jej pomijanie w obliczeniach może stanowić znaczący składnik ogólnego błędu aproksymacji modeli. Nie wiemy natomiast, ze względu na trudności metodyczne wyznaczenia, jaką wartość oporu toczenia opon stanowi ta część, która wynika z odkształceń opon podczas ich poruszania się na glebie. Niektórzy autorzy próbowali uwzględnić ten składnik w modelach jednak na podstawie danych uzyskiwanych na podłożach twardych [Bekker 1969; Wong 2001], między innymi na podstawie odkształceń opon, które znacznie różnią się od uzyskiwanych na podłożu glebowym [Błaszkiwicz 1997].

Dlatego też celem niniejszej pracy jest opracowanie modelu do wyznaczenia tej części oporu toczenia opon, która wynika z odkształceń opony w glebie oraz wyznaczenie wartości tego oporu.

### Budowa modelu

Opona ulega deformacji pod wpływem nałożonego na nią obciążenia, ulegając spłaszczeniu w dolnej części styku z podłożem. Przyjęto, że powierzchnia oparcia odkształconej opony na dnie koleiny przyjmuje kształt płaski (rys. 1).



Rys. 1. Parametry niezbędne do wyznaczenia siły oporu toczenia opony pochodzącej od jej ugięcia

Fig. 1. The parameters needed for the determination of the wheel resistance force results from the tyre vertical deformation in soil

Wartość oporu toczenia opony wynikającego z jej ugięcia w glebie przyjęto określić ze znanego warunku równości prac koła, w którym zakłada się, że praca pionowego odkształcenia opony (1) jest równa pracy przeznaczony na jej toczenie (2). Przedstawiony sposób obliczeń sił oporu toczenia  $P_{ju}$  wynika z charakteru założonego rodzaju zależności  $P_{ju} = f(r_d)$ , w której  $P_{ju}$  to cząstkowa siła działająca na płaską powierzchnię odkształconej opony, natomiast  $r_d$  jest wartością ugięcia opony. Praca pionowego odkształcenia gleby jest sumą prac cząstkowych wykonanych przez siły  $P_{ju}$  na odległości  $\Delta r_d$ :

$$A_c'' = \sum_{j_u=0}^{j_u=j_{max}} (P_{j_u} \cdot \Delta r_d) \quad (1)$$

gdzie:

- $A_c''$  – suma prac cząstkowych wykonanych przez siły  $P_{j_u}$  na odległości  $\Delta r_d$ ,
- $P_{j_u}$  – cząstkowa siła działająca na powierzchnię opony powodująca ugięcie opony o wartość  $\Delta r_d$ ,
- $\Delta r_d$  – cząstkowe ugięcie opony – droga wykonania pracy przez siłę  $P_{j_u}$ ,
- $j_u$  – kolejne rozpatrywane ugięcie opony licząc od  $j = 0$  dla opony nieodkształconej, do  $j = j_{max}$  dla opony odkształconej.

Natomiast praca poziomego przetaczania koła wykonana przez siłę  $P_{f_u}$  na długości  $l_u$  jest obliczana ze wzoru:

$$A_c' = P_{f_u} \cdot l_u \quad (2)$$

gdzie:

- $A_c'$  – praca wykonana przez siłę  $P_{f_u}$  na długości  $l_u$ ,
- $P_{f_u}$  – siła oporu toczenia wynikająca z ugięcia opony,
- $l_u$  – długość płaskiej powierzchni opony powstałej w wyniku jej ugięcia,

Po przyrównaniu i przekształceniu powyższych wzorów otrzymamy ostateczne równanie na siłę oporu toczenia wynikającą z ugięcia opony w glebie:

$$P_{f_u} = \frac{\sum_{j_u=0}^{j_u=j_{max}} (P_{j_u} \cdot \Delta r_d)}{l_u} \quad (3)$$

Wyznaczenie sił  $P_{j_u}$  niezbędnych do obliczeń według wzoru 3 przyjęto dokonywać z zależności siły ugięcia opony od wartości jej ugięcia  $P_{j_u}=f(r_d)$ . Takie zależności uzyskuje się na podłożu glebowym na postoju koła, kiedy przy wzrastającym obciążeniu opony określa się jej ugięcie  $r_d$  i posiadają one często charakter zależności liniowej [Błaszkiwicz 1997]. Zależności takie są jednak nieprzydatne do naszych obliczeń bowiem przyrównują one odkształcenie opony w glebie do obciążenia koła, natomiast założono w niniejszej pracy, że interesujące nas odkształcenie opony w glebie następuje pod wpływem siły działającej na część płaską opony opierającej się na dnie koleiny. Możliwość wyznaczenia tej siły daje natomiast uprzednio opracowany model opona–gleba przez Błaszkiwicza [1997] i program komputerowy. Ten program komputerowy sprawdza, na podstawie wielu parametrów opon i gleby, w kolejnych pętlach iteracyjnych, równowagę pionowych sił wynikających z obciążenia opony i oporu gleby działających na oponę,

poczynając od zerowego zagłębienia aż do zagłębienia opony spełniającego powyższy warunek. Po uzyskaniu powyższej równowagi program podaje między innymi wartość siły  $P_j$ , z jaką działa opona na dno koleiny wymaganej do obliczeń oporu toczenia koła. Na podstawie wartości tej siły i wartości maksymalnego rozważanego ugięcia opony jest wyznaczana matematycznie charakterystyka liniowa zależności  $P_{ju} = f(r_d)$ .

## Metody badań i uzyskane wyniki

### *Numeryczna metoda wyznaczania oporu toczenia wynikającego z ugięcia opony*

Do wykonywania obliczeń oporu toczenia według wzoru 3 został opracowany przez autorów krótki program komputerowy, który dokonuje obliczeń sił ugięcia  $P_{ju}$  dla kolejnych wartości ugięcia  $r_{dj}$  w zakresie ugięcia od 0 aż do  $r_{d \max}$ . Dla potrzeb wzoru 3, w wyznaczonej empirycznie zależności  $P_{ju} = f(r_d)$  w miejsce  $r_{dj}$  wstawiana jest wartość pionowej odległości położenia siły  $P_{ju}$  od obwodu opony nieodkształconej  $h_j$ . Założono bowiem, że dana siła cząstkowa  $P_{ju}$  położona jest w połowie drogi, na której wykonuje ona pracę (rys. 1). Wzór na obliczenie wartości  $h_j$  jest następujący:

$$h_j = j_u \cdot \Delta r_d - \frac{\Delta r_d}{2} \quad (4)$$

w którym liczba rozpatrywanych ugięć opony  $j_u$  jest określana ze wzoru:

$$j_u = \frac{r_{d \max}}{\Delta r_d} \quad (5)$$

Wartość  $\Delta r_d$  jest przyjmowana w zależności od żądanej dokładności obliczeń.

Udział oporu toczenia wynikającego z ugięcia opony obliczonego w niniejszej pracy w całkowitej wartości oporu toczenia koła dokonano ze wzoru:

$$e = 100 \cdot \frac{w_o}{w_d}, \quad \% \quad (6)$$

- $e$  – udział procentowy oporu toczenia wynikającego z ugięcia opony, %,
- $w_o$  – wartość oporu toczenia wynikającego z ugięcia opony uzyskana z obliczeń, w kN,
- $w_d$  – wartość ogólnego oporu toczenia opony uzyskana w badaniach empirycznych, w kN.

W niniejszej pracy dokonano obliczeń ze wzoru 3 oporu toczenia tej części oporu toczenia opon, która wynika z odkształceń opony w glebie za pomocą opracowanego nowego programu komputerowego. Uzyskane wyniki porównano z wartościami ogólnego oporu toczenia tych samych opon uzyskanymi w badaniach polowych. Analizę przeprowadzono dla opon: 23.1-26 oraz 14.9-28 dla tych samych warunków glebowych oraz eksploatacyjnych (tabela 1). Takie postępowanie pozwoliło na określenie udziału tylko tej części oporu toczenia opon, która wynika z odkształceń opony w glebie z wartościami eksperymentalnymi ogólnego oporu toczenia opon będącego rezultatem działania wszystkich jego składników.

Tabela 1. Dane wejściowe do obliczeń w postaci parametrów opon, podłoża oraz bewametry płytkowego

Table 1. Input data for the calculation - the parameters of the tyre, soil and bevameter

Parametry	Opona 23.1-26	Opona 14.9-28
Wymiary opon: - promień opony - szerokość - wysokość - wysokość do najszerszego miejsca opony	$r_0 = 76,2 \text{ cm}$ $b_0 = 60,0 \text{ cm}$ $h = 43,0 \text{ cm}$ $H = 23,5 \text{ cm}$	$r_0 = 69,0 \text{ cm}$ $b_0 = 40,8 \text{ cm}$ $h = 33,4 \text{ cm}$ $H = 18,7 \text{ cm}$
Parametry eksploatacyjne opon: - obciążenie - ciśnienie wewnętrzne	$G = 14 \text{ kN}$ $p_w = 100 \text{ kPa}$	$G = 9 \text{ kN}$ $p_w = 80 \text{ kPa}$
Odkształcenia opon: - promieniowe - boczne	$r_d = 1,3 \text{ cm}$ $b_d = 2,4 \text{ cm}$	$r_d = 1,5 \text{ cm}$ $b_d = 1,5 \text{ cm}$
Parametry trakcyjne gleby: - moduł odkształcalności gleby - wykładnik określający wł. trakcyjne gleby - spójność - kąt tarcia wewnętrznego - współczynnik poziomej odkształcalności gleby	$k = 0,0119 \text{ kN/cm}^2$ $n = 0,587 [-]$ $c = 0,00116 \text{ kN/cm}^2$ $\Phi = 25^\circ$ $K = 1,650 [-]$	
Parametry bewametry i inne: - parametr podobieństwa elementów czynnych bewametry i opony - parametr skali sił płytki bewametry i opony - szerokość płytki bewametry - powierzchnia płytki bewametry	$\lambda = 3,0 [-]$ ; dla opony 23.1-26 $\lambda = 2,0 [-]$ ; dla opony 14.9-28 $x = 2,7 [-]$ $b_p = 10 \text{ cm}$ $F_p = 100 \text{ cm}^2$	

## Metody badań empirycznych i uzyskane wyniki

Badania polowe przeprowadzono w Rolniczym Gospodarstwie Doświadczalnym ZŁOTNIKI leżącym w gminie Suchy Las, w powiecie poznańskim na glebie lekkiej o składzie granulometrycznym piasku gliniastego. Na polu przed badaniami, po zbiorze żyta w uprawie konwencjonalnej wykonano orkę na głębokość 25 cm. Gęstość objętościowa gleby wynosiła  $1,31\text{g/cm}^3$ , natomiast wilgotność wagowa 7,4%. Badano opony napędowe w zakresie parametrów eksploatacyjnych najczęściej stosowanych w niniejszych warunkach badań (tabela 1). Podczas ruchu po glebie spulchnionej mierzono za pomocą siłomierza indukcyjnego DiR3 opór toczenia opon 23.1-26 zamontowanych do ciągnika Ursus C 385 oraz opon 14.9-28 zamontowanych do ciągnika ZETOR 5211. Ciągniki z badanymi oponami podczas pomiarów były ciągnięte innym ciągnikiem w celu wyeliminowania momentów obrotowych ich kół napędowych. Pomiarów odkształceń promieniowych i bocznych opon dokonywano metodami i aparaturą przedstawioną w innych pracach autora [Błaszkiwicz, 1996a, 1996b]. Pomiary parametrów trakcyjnych gleby k oraz n dokonano na podstawie pomiarów dokonanych za pomocą bewametry ręcznego [Błaszkiwicz, 1995], zgodnie z metodą przedstawioną przez Bekkera [1969] i Wonga [2001]. Parametry podobieństwa płytki bewametry do opony niezbędne do modelu opona–gleba określono metodami przedstawionymi w pracy Błaszkiwicza [1997]. Uzyskane rezultaty zamieszczono odpowiednio w tabeli 1 i 2.

Tabela 2. Wartości oporu toczenia opon uzyskane z obliczeń i z badań polowych  
Table 2. The results of the tyre rolling resistance obtained from the calculations and field investigation.

Opona	Ogólny opór toczenia opony $P_f$ , w kN (z badań polowych)	Badany składnik oporu toczenia opony $P_{fu}$ , w kN (z obliczeń)	Udział procentowy (%)
14.9-28	1.55	0,061	3,9
23.1-26	2.75	0,083	3,0

## Omówienie uzyskanych rezultatów i podsumowanie

Jak wynika z analizy wyników przedstawionych w tabeli 2 wartości oporu toczenia wynikające z odkształceń badanych opon w glebie są bardzo małe i wynoszą maksymalnie do około 4% wartości ogólnego zmierzonego eksperymentalnie oporu toczenia tych samych opon. Wartości oporu toczenia wynikające z odkształceń opon w glebie są obliczone i nie zweryfikowane empirycznie, bowiem ich weryfi-

kacja jest jak dotąd bardzo trudna do przeprowadzenia. Można jednak przyjąć, że są one dość zbliżone do empirycznych ze względu na to, że zweryfikowany empirycznie model opona–gleba, z którego wyznaczano siłę działającą na dno koleiny, wyznacza inne parametry opon w glebie ze stosunkowo dużą dokładnością [Błaszkiwicz 1997]. Przedstawione powyżej ogólne stwierdzenia wymagają jednak dalszej weryfikacji w poszerzonych badaniach symulacyjnych i empirycznych.

W podsumowaniu można wskazać, że ze względu na małą wykazaną wartość oporu toczenia wynikającą z ugięcia opon w glebie można ten składnik oporu toczenia pominąć w obliczeniach parametrów trakcyjnych dokonywanych z modeli układu opona–gleba, jak to powszechnie czyni się dotychczas.

### **Bibliografia**

Bekker M.G. 1969. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Ann Arbor. The University of Michigan Press.

Błaszkiwicz Z. 1995. Przyrząd do badania właściwości mechanicznych podłoży miękkich. Opis ochronny wzoru użytkowego PL 54258Y1.

Błaszkiwicz Z. 1996a. Research methods and measurement results of agricultural tyre deflections on soil. Part I. A method for measuring radial and longitudinal tyre deflections. Annual Review of Agricultural Engineering. 1(1). 131-138.

Błaszkiwicz Z. 1996b. Research methods and measurement results of agricultural tyre deflections on soil. Part II. A method for measuring lateral tyre deflections. Annual Review of Agricultural Engineering. 1(1)/96. 139-146.

Błaszkiwicz Z. 1997. Badania wpływu wybranych parametrów opon rolniczych na ugniatanie gleby. Rozprawy naukowe. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Z. 271. Stron 156.

Manufacture francaise des pneumatiques Michelin. Opona: opór toczenia, a oszczędność paliwa. Clermont-Ferrand : Société de Technologie Michelin, 2003.

Szafarz A., Błaszkiwicz Z. 2006. Analiza dokładności modeli układu koło - podłoże dla warunków spulchnionej gleby lekkiej. Inżynieria Rolnicza (w druku).

Wong J.Y. 2001. Theory of ground vehicles. Third edition by John Wiley & Sons, Inc.

**A MODEL FOR THE DETERMINATION  
OF THE WHEEL RESISTANCE FORCE RESULTS  
FROM THE TYRE DEFORMATION IN THE SOIL**

**Summary**

In this work the new model for the determination of the wheel resistance force results from the tyre vertical deformation in the soil, is presented. This part of the tyre resistance force was calculated from this new model on the basis of the field and labour investigation results. From the comparative analysis was stated that the resistance forces results from the tyre deformation in the soil during the wheel motion amount to about 3-4% of the global wheel resistance force.

**Key words:** model, tyre vertical deformation in the soil, wheel resistance forces