

Zbigniew Błaszkiwicz  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Akademia Rolnicza w Poznaniu

## MODEL DO WYZNACZANIA OPORU TOCZENIA OPON

### Streszczenie

W pracy przedstawiono nowy model do wyznaczania oporu toczenia opon opracowany przez autora. Model jest oparty na uproszczonej metodzie wyznaczania przestrzennego kształtu powierzchni kontaktu opony z podłożem i uwzględnia odkształcenia opon. Przeprowadzona weryfikacja empiryczna modelu wykazała dużą zgodność wyników uzyskanych z obliczeń z wynikami badań doświadczalnych.

**Słowa kluczowe:** opór toczenia opon, model, weryfikacja empiryczna

### Wstęp

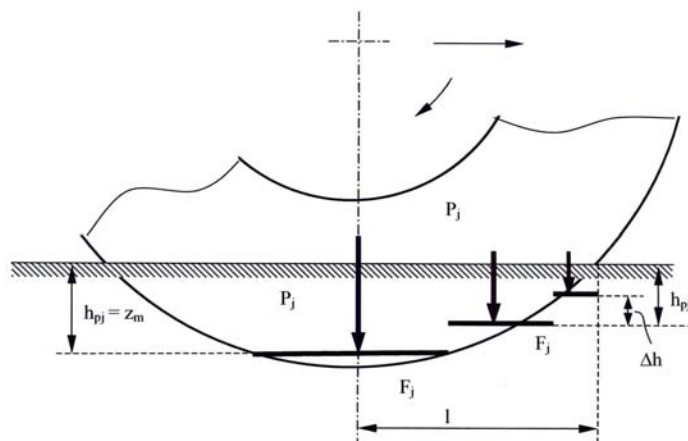
Opór toczenia kół pojazdów stanowi znaczący składnik energii traconej na pokonanie oporów ruchu podczas wykonywania prac polowych na miękkich podłożach glebowych, zwłaszcza na spulchnionych glebach lekkich [Bekker 1969; Wong 2001]. Znane modele w literaturze przedmiotu są mało przydatne do prognozowania oporu toczenia kół ogumionych ze względu na małą dokładność przy odniesieniu do powyższych warunków glebowych [Szafarz i Błaszkiwicz 2005]. Mała zbieżność wyników obliczeń z tych modeli do wyników badań empirycznych wynika, jak należy przypuszczać, z zastosowanych w nich uproszczeń, dotyczących zwłaszcza przyjmowania uproszczonego kształtu koła w formie walca oraz nie uwzględnianie odkształceń opon zwykle towarzyszących ruchowi. Powyższe parametry są uwzględniane w opracowanym uprzednio modelu opona-gleba [Błaszkiwicz 1997], w którym uwzględniany jest przestrzenny kształt powierzchni kontaktu opony z glebą i odkształcenia opon, przeznaczonym do prognozowania głębokości koleiny i zagęszczenia gleby w koleinach. Z analizy tego modelu wynika, że pozwala on również na wyznaczenie parametrów wyjściowych przydatnych przy określaniu oporu toczenia koła.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie nowego modelu do wyznaczania oporu toczenia kół ogumionych poprzez rozwinięcie modelu opona - gleba opracowanego uprzednio przez autora.

## Budowa modelu

W modelu opona-gleba są stosowane dwie alternatywne metody wyznaczania parametrów przestrzennej powierzchni kontaktu - metoda szczegółowa i metoda uproszczona [Błaszkiwicz 1997]. Przy modyfikacji tego modelu do wyznaczaniu oporu toczenia kół wybrano metodę uproszczoną, bardziej przydatną praktycznie, bowiem jak wykazano w tej samej pracy, jej stosowanie nie powoduje znaczącej zmiany dokładności modelu opona-gleba.

W modelu opona – gleba są wyznaczane cząstkowe powierzchnie kontaktu położone na przestrzennej powierzchni kontaktu opony z glebą i siły na nie działające położone na różnych głębokościach w podłożu. Powyższe parametry wykorzystano w metodzie teorii służącej do wyznaczania oporu toczenia koła, w której przyrównuje się pracę pionowego odkształcenia gleby powodowanego przez toczone koło do pracy poziomego odkształcenia gleby [Bekker 1969; Wong 2001]. W odniesieniu do zależności dotyczących modelu opona – gleba, przedstawionych na rysunku 1, praca pionowego odkształcenia gleby jest sumą prac cząstkowych wykonywanych na głębokości  $h_{pj}$  przez cząstkowe powierzchnie kontaktu  $F_j$ , natomiast praca na pokonanie oporu poziomego gleby jest iloczynem poziomej siły oporu toczenia koła  $P_f$  i jego przemieszczenia na drodze  $l$ .



Rys. 1. Schemat położenia parametrów na przestrzennej powierzchni kontaktu opony z podłożem niezbędnych dla wyznaczenia oporu toczenia koła ( $z_m$  – głębokość koleiny)

Fig. 1. A scheme of the situation of the parameters at the spatial contact area needed for the determination of the wheel resistance forces ( $z_m$  – rut depth)

W niniejszym przypadku praca każdej z cząstkowych powierzchni  $F_j$  jest sumą prac cząstkowych wykonywanych na drodze  $\Delta h$  przez siły  $P_j$  wywierane na glebę przez cząstkowe powierzchnie kontaktu  $F_j$  występujące na różnej określonej głębokości  $h_{pj}$ . Zatem pracę takiej pojedynczej cząstkowej powierzchni kontaktu wykonywaną na całej analizowanej głębokości, możemy opisać poniższym wyrażeniem:

$$A_c = \sum_{j=1}^j (P_j \cdot \Delta h) \quad (1)$$

gdzie:

- $A_c$  – praca jednej cząstkowej powierzchni kontaktu,
- $P_j$  – wartości kolejnych sił oporu gleby  $P_j$  występujące na kolejnych określonych głębokościach  $h_{pj}$ ,
- $\Delta h$  – grubość rozważanej warstwy odkształcanej gleby,

Natomiast praca pionowego odkształcenia gleby powodowanego przez wszystkie cząstkowe powierzchnie kontaktu wynosi:

$$A_{ct} = \sum_{c=1}^c \left( \sum_{j=1}^j P_j \cdot \Delta h \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $A_c$  – praca pionowego odkształcenia gleby powodowanego przez cząstkowe powierzchnie kontaktu,
- $l$  – poziome przemieszczenie koła,
- $c$  – liczba cząstkowych powierzchni kontaktu.

Przyrównując pracę wyrażoną wzorem 2 do pracy poziomego odkształcenia gleby powodowanego przez koło i wstawiając wyrażenie, wyprowadzone uprzednio przez autora - przedstawione w jego innej pracy [Błaszkiwicz 1997] na obliczenie sił  $P_j$  wywieranych na glebę przez cząstkowe powierzchnie kontaktu  $F_j$ , uzyskujemy ogólną postać modelu do obliczenia oporu toczenia koła:

$$P_f = \frac{\sum_{c=1}^c \left\{ \sum_{j=1}^j [ F_j \cdot k \cdot \lambda^{n-2} \cdot \left( \frac{h_{pj}}{b_p} \right)^n \Delta h ] \right\}}{l} \quad (3)$$

gdzie:

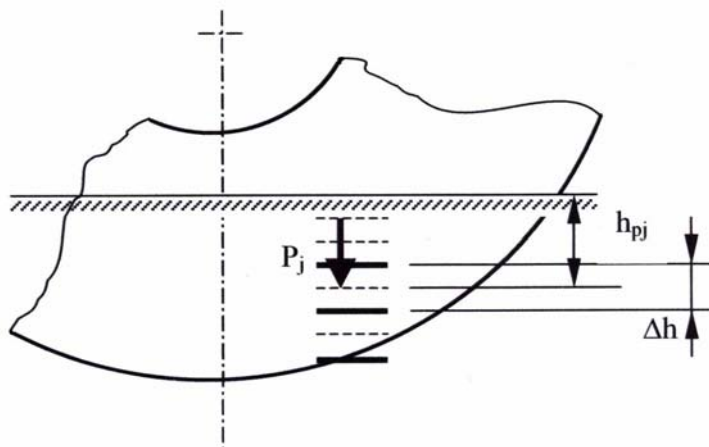
- $P$  – siła oporu toczenia opony,
- $F_j$  – pola cząstkowych powierzchni kontaktu opony z glebą,
- $k, n$  – parametry trakcyjne gleby,
- $\lambda$  – parametr podobieństwa płytki bewametry i opony,

- $x$  – wykładnik charakteryzujący skalę sił płytki bewametry i opony,
- $h_{pj}$  – głębokość położenia cząstkowej powierzchni kontaktu  $F_j$ ,
- $b_p$  – szerokość płytki bewametry.

Dla przeprowadzenia obliczeń oporu toczenia opon został napisany nowy program komputerowy KONTAKT-2.O.P. przez autora pracy oraz przez Artura Szafarza.

### Weryfikacja modelu i uzyskane wyniki

Weryfikacji modelu dokonano na podstawie porównania oporu toczenia wybranych opon, pomierzonego w badaniach empirycznych do jego wartości uzyskanych z modelu 2.



Rys. 2. Schemat położenia jednej cząstkowej powierzchni kontaktu wykonującej pracę na drodze zagłębienia

Fig. 2. A scheme of the situation of the single partial contact area realized the work at the sinkage

Badania empiryczne przeprowadzono w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym Złotniki na polu po uprawie żyta, które zostało spulchnione do głębokości 24 cm podczas orki. Gleba charakteryzowała się składem granulometrycznym piasku gliniastego, posiadała w profilu średnią gęstość objętościową wnoszącą  $1.31 \text{ gcm}^{-3}$  i wilgotność wagową od 6 do 7%. Badano opony napędowe 16.9–34 i 23.1-26 w zakresie parametrów eksploatacyjnych najczęściej stosowanych w niniejszych warunkach badań (tabela 1). Pomiary parametrów trakcyjnych gleby  $k$  oraz  $n$  dokonano na podstawie rezultatów badań polowych przeprowadzonych za pomocą

bewametr ręczny [Błaszkiwicz 1995], zgodnie z metodą przedstawioną przez Bekkera [1969] i Wonga [2001]. Parametry podobieństwa płytki bewametr do opony niezbędne do modelu określono metodami przedstawionymi w pracy Błaszkiwicza [1997]. Podczas badań polowych mierzono opór toczenia badanych opon zamontowanych do ciągnika Ursus C 385 za pomocą siłomierza indukcyjnego DiR3 i kontrolowano poślizg za pomocą systemu oprzyrządowania komputera pokładowego LH 5000. Ciągnik z badanymi oponami był podczas pomiarów ciągniony innym ciągnikiem, aby wyeliminować moment obrotowy jego kół napędowych. Pomiarów odkształceń promieniowych i bocznych opon dokonywano metodami i aparaturą przedstawioną w innych pracach autora [Błaszkiwicz, 1996a, 1996b]. Uzyskane rezultaty badań zamieszczono w tabeli 1 i 2.

*Tabela 1. Dane wejściowe do obliczeń w postaci parametrów opon, podłoża oraz bewametru płytkowego*  
*Table 1. Input data for the calculation - the parameters of the tyre, soil and bevameter*

Parametry	Opona 16.9-34	Opona 23.1-26
Wymiary opon (w cm): - promień - szerokość - wysokość - wysokość do najszerszego miejsca	$r_0 = 74,7$ $b_0 = 44,0$ $h = 31,5$ $H = 18,5$	$r_0 = 76,2$ $b_0 = 60,0$ $h = 43,2$ $H = 23,5$
Parametry eksploatacyjne opon: - obciążenie pionowe - ciśnienie wewnętrzne - nacisk jednostkowy	$G = 13,4 \text{ kN}$ $p_w = 100 \text{ kPa}$ $q = 110 \text{ kPa}$	$G = 18,15 \text{ kN}$ $p_w = 80 \text{ kPa}$ $q = 100 \text{ kPa}$
Odształcenia opon (cm): - promieniowe - boczne	$r_d = 1,6$ $b_d = 1,3$	$r_d = 1,8$ $b_d = 3,8$
Parametry trakcyjne gleby:	$k = 0,0119 \text{ kN/cm}^2$ $n = 0,587 [-]$	
Parametry bewametr i inne:	$\lambda = 2,2 [-]$ ; dla opony 16.9-34 $\lambda = 3,0 [-]$ ; dla opony 23.1-26 $x = 2,7 [-]$ $b_p = 10 \text{ cm}$ $F_p = 100 \text{ cm}^2$ (powierzchnia płytki bewametr)	

Dokładność uzyskanych rezultatów obliczeń z opracowanego modelu do wyników badań empirycznych (przedstawionych w tabeli 2), opisano za pomocą błędów względnych aproksymacji. Błędy te obliczano z następującego wzoru:

$$e = 100 \cdot \frac{|w_d - w_e|}{w_d}, \% \quad (4)$$

- $e$  – błąd względny aproksymacji, %,  
 $w_o$  – wartość oporu toczenia opony uzyskana z obliczeń, w kN,  
 $w_d$  – wartość oporu toczenia opony uzyskana w badaniach empirycznych, w kN.

Obliczone wartości błędów dla oporu toczenia badanych opon zamieszczono odpowiednio w tabeli 2.

*Tabela 2. Rezultaty weryfikacji empirycznej modelu*

*Table 2. The results of the empirical verification of the tyre-soil model*

Opona	Opór toczenia $P_f$ , w kN (z badań polowych)	Opór toczenia $P_f$ , w kN (z badań symulacyjnych)	Błąd względny aproksymacji (%)
16.9-34	1.85	1.95	2.5
23.1-26	2.75	2.68	5.4

## Omówienie rezultatów badań i podsumowanie

Obliczenia parametrów  $P_j$ ,  $h$  oraz  $l$ , niezbędnych do wyznaczenia oporu toczenia opon, są realizowane z wykorzystaniem opracowanego uprzednio przez autora modelu opona – gleba. W modelu tym do obliczeń stosuje się metody numeryczne. Opracowany program komputerowy sprawdza, na podstawie wielu parametrów opon i gleby, w kolejnych pętach 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. Wyznaczone równolegle parametry są wykorzystane do obliczeń oporu toczenia koła ze wzoru 3.

Wyprowadzona postać modelu zaprezentowana w niniejszej pracy jest przeznaczona do określania oporu toczenia kół nie rozwijających siły uciągu, gdyż takie ograniczenia posiada model opona-gleba wyznaczający parametry wyjściowe obliczeń. Z przeprowadzonej analizy weryfikacji empirycznej dla powyższego ograniczenia i uprzednio podanych warunków badań wynika, że opracowany

model wspomagany numerycznie daje wyniki obliczeń oporu toczenia badanych opon zdecydowanie bardziej zbliżone do wyników badań empirycznych w porównaniu do znanych równań teorii. Wynika to z porównania błędów aproksymacji przedstawionych w niniejszej pracy do obliczonych dla równań Wonga czy Uffelmana, wynoszących powyżej 70%, a przedstawionych w pracy Szafarza i Błaszkiwicza [2005].

W podsumowaniu należy wskazać na podstawie powyższego, że uprzednio opracowany przez autora pracy model opona – gleba, staje się bardziej uniwersalny i przydatny praktycznie bowiem oprócz prognozowania ugniatania gleby stanowi również podstawę do wyznaczania parametrów do prognozowania oporu toczenia kół z nowego modelu zaprezentowanego w niniejszej pracy. Przedstawione powyżej ogólne stwierdzenie wymaga jednak dalszej weryfikacji w poszerzonych badaniach empirycznych.

### **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 podłoża 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.

Szafarz A., Błaszkiwicz Z. 2005. 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.

*Dziękuję Panu mgr inż. Arturowi Szafarzowi za napisanie programu komputerowego wspomagającego obliczenia oporu toczenia kół na bazie opracowanego przeze mnie modelu i algorytmu obliczeń numerycznych.*

## **A MODEL FOR THE DETERMINATION OF THE WHEEL RESISTANCE FORCES**

### **Summary**

In this work the new model for the determination of the wheel resistance force elaborated by author, is presented. This model contains the simplified method for the determination of the parameters of the spatial contact area the tyre with the soil and takes wheel deformations. The empirical verification shows good agreement of the calculated resistance forces of the tyres obtained from the model with the experimental results.

**Key words:** wheel resistance force, model, empirical verification