

## OPRACOWANIE MODELU REOLOGICZNEGO „MASZYNA–GLEBA”

Yuri Chigarev, Rafał Nowowiejski

*Institut Inżynierii Rolniczej Akademia Rolnicza w Szczecinie*

Mikołaj Romaniuk

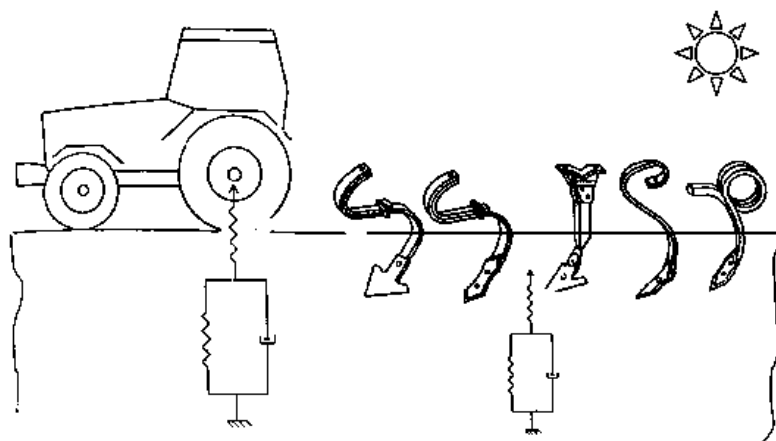
*Białoruski Uniwersytet Rolniczo-Techniczny w Mińsku*

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia model reologiczny układu składającego się z gleby oraz pojazdu rolniczego. Ukazano również rozwiązania tego modelu dla przypadków, gdy koło pojazdu przenosi obciążenia udarowe jak i obciążenie cyklicznie zmienne.

**Słowa kluczowe:** model reologiczny gleby, naprężenie, odkształcenie

### Wstęp i cel pracy

Wiadomym jest, że obciążenie gleby pochodzące od maszyn i sprzętu rolniczego jest sumą składowych-obciążenia statycznego (masa sprzętu) i obciążenia dynamicznego, które związane z układem napędowym, nierównością i kamienistością pola i innymi czynnikami powiązanymi z glebą i pojazdem mechanicznym. (rys. 1).



Rys. 1. Źródła drgań w glebie

Fig. 1. Sources of vibrations in the soil

Większość prac teoretycznych i doświadczalnych dotyczących oddziaływania koła i gleby wykonano z uwzględnieniem jedynie obciążenia statycznego. Istniejące normy lub regulacje prawne określające dopuszczalne poziomy nacisków kół pojazdów rolniczych na glebę zbadano jedynie w warunkach obciążenia statycznego. Jednakże składowa dynamiczna ma znaczący wpływ nie tylko na zagęszczenie gleby, ale może również negatywnie oddziaływać na jej część ożywioną, np. na populację dżdżownic.

Konieczność opracowania modelu gleby uwzględniającego obciążenia dynamiczne podyktowana jest zagrożeniami wynikającymi z nadmiernego zagęszczenia gleby współczesnym sprzętem rolniczym, co może doprowadzić do przyspieszonej degradacji gleby. Rezultatem degradacji gleb może być utrata równowagi agroekosystemu. Nastąpić może wtedy lokalny kryzys ekologiczny, który zmieni fitocenozę, zoocenozę, mikrobiocenozę danego agroekosystemu. Sporo lokalnych agrokryzysów może być istotnymi składowymi kryzysu globalnego, który może doprowadzić do załamania cyklu biologicznego biosfery. Według opublikowanych danych nadmierne zagęszczenie gleby wywołane techniką rolniczą jest główną przyczyną degradacji 33 milionów ha użytków rolnych tylko na terenie Europy. Ponadto ocenia się, że dodatkowo około 32% użytków rolnych jest bardzo podatnych na zagęszczenie, jeśli nie będą podjęte środki temu przeciwdziałające. Zagęszczenie gleby wpływa na pogorszenie się struktury oraz fizycznych parametrów gleby (gęstość, wilgotność, porowatość, przepuszczalność powietrza, itd.), na obniżenie zawartości humusu, na zwiększenie zapotrzebowania na energię przy uprawie gleby nawet o 30% i zużycie nawozów mineralnych o 30-40% oraz zwiększone zużycie zespołów pracujących w glebie.

Celem pracy jest określenie statycznego oraz dynamicznego wpływu oddziaływania maszyn i pojazdów rolniczych na wartość odkształcenia gleby. Dla zrealizowania danego zadania będzie zastosowany model matematyczno-mechaniczny z parametrami reologicznymi.

Strona naukowo-poznawcza związana jest z dążeniem do pogłębiania wiedzy o wpływie drgań kół maszyn i pojazdów rolniczych, czyli dynamicznego składnika obciążenia gleby na jej odkształcenie z uwzględnieniem obciążenia statycznego.

### Model matematyczno-mechaniczny

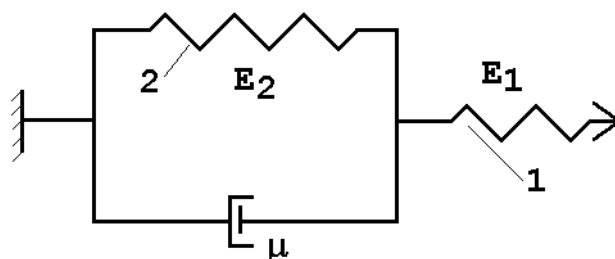
Istnieją różne matematyczno-mechaniczne modele gleby. Uwzględniają one właściwości reologiczne gleby – sprężystość, lepkość, plastyczność. W zależności od stanu fizycznego gleby można ją opisać jednym z powyższych parametrów lub ich kombinacją. Dla opisu niesprężystego stanu gleb często wykorzystywane są reologiczne modele Kelvina-Voigta lub Makswella. Jednak modele te mają swoje wady. Środowisko Kelvina-Voigta w momentach przyłożenia obciążenia dynamicznego jest nieściśliwe. Środowisko Makswella przy działaniu obciążenia statycznego jest nieograniczenie odkształcalne. Do rozwiązywania zagadnień dynamicznych wykorzystywany jest zwykle ogólny model ośrodka sprężysto-lepkiego (rys. 2) [Liachow 1982].

Ściskanie sprężyny 1 odbywa się zgodnie z prawem Hooke'a

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \quad (1)$$

gdzie:

- $\varepsilon$  – odkształcenie sprężyny;
- $\sigma$  – naprężenie normalne;
- $E_1$  – dynamiczny moduł sprężystości.



Rys. 2. Ogólny model ośrodka sprężysto-lepkiego  
 Fig. 2. The general model of springy-viscous medium

Zależność pomiędzy naprężeniem a odkształceniem w dowolnej chwili dla modelu ogólnego zapisać można w następującej postaci

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_1} \cdot \frac{d\sigma}{dt} + \eta \cdot \left( \frac{\sigma}{E_s} - \varepsilon \right) \quad (2)$$

gdzie:

- $E_s = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$  – statyczny moduł sprężystości;
- $\mu = \frac{E_s \cdot E_1}{\eta \cdot (E_1 - E_s)}$  – parametr lepkości;
- $E_2$  – moduł sprężystości sprężyny 2;
- $\eta$  – współczynnik lepkości.

## Metodyka badań

Rozpatrmy obciążenie koła na głębę jako sumę sił – statycznej i dynamicznej

$$P = P_0 + P_1(t) \quad (3)$$

gdzie:

- $P_0$  – obciążenie statyczne działające na oś koła;
- $P_1(t)$  – obciążenie dynamiczne, zależne m.in. od nierówności powierzchni pola, układu napędowego pojazdu.

Maksymalne naciski w obszarze kontaktu koła z głębą opisane są równaniem

$$\sigma_m = \frac{M \cdot (g \pm \ddot{x})}{S} = \frac{P_0 + P_1(t)}{S} \quad (4)$$

gdzie:

- $M = (m_1 + m_2)$  – masa przypadająca na oś koła;
- $m_1$  – masa resorowana;

- $m_2$  – masa koła;  
 $S$  – pole kontaktu koło-gleba;  
 $\ddot{x}$  – przyspieszenie pionowe osi koła;  
 $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Niech naprężenie  $\sigma_m$  spełnia warunki

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_m \left(1 - \frac{t}{\Theta}\right) & \text{dla } 0 \leq t \leq \Theta \\ \sigma = 0 & \text{dla } t < 0, t > \Theta \end{cases} \quad (5)$$

Warunki (5) mają miejsce w przypadku obciążenia udarowego np. przy poruszaniu się koła po glebie zakamienionej.

W przypadku obciążenia zmieniającego się według funkcji okresowej w obszarze kontaktu koło-gleba spełniane są następujące warunki

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_m \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{\Theta}\right) & \text{dla } 0 \leq t \leq \infty \\ \sigma = 0 & \text{dla } t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Rozwiązaniem równania (2) w przypadku obciążenia udarowego jest [1, 2]:

$$\mathcal{E}(t) = -\frac{A}{\mu} + \frac{B}{\mu^2}(1 - \mu t) + C e^{-\mu t} \quad (7)$$

gdzie:

$A, B$  i  $C$  są współczynnikami zależnymi od  $\mu, \sigma_m, E_1, E_2, \Theta$ .

Rozwiązanie równania (2) w przypadku występowania warunków (6) ma postać

$$\mathcal{E}(t) = \frac{k(\omega \sin \omega t + \mu \cos \omega t)}{a} + \frac{L(\omega \sin \omega t - \mu \cos \omega t)}{a} + D e^{-\mu t} \quad (8)$$

gdzie:

$a = \omega^2 + \mu^2$ ,  $\omega = \pi/\Theta$  a współczynniki  $k, L, D$  są zależne od  $\mu, \sigma_m, E_1, E_2$ .

Współczynniki te mają postać:

$$A = \frac{\sigma_m}{E_1 \Theta} \left(1 - \frac{E_1}{E_2} \mu \Theta\right);$$

$$B = \frac{\sigma_m \mu}{E_2 \Theta};$$

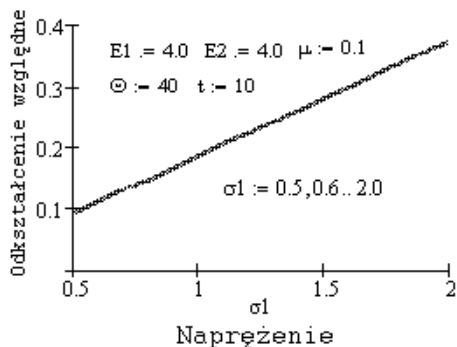
$$C = \frac{\sigma_m}{E_1} + \frac{D}{\mu} - \frac{B}{\mu^2};$$

$$D = \frac{\sigma_m}{E_1} + \frac{L\omega - k\mu}{\omega^2 + \mu^2};$$

$$k = \frac{\sigma_m \omega}{E_1};$$

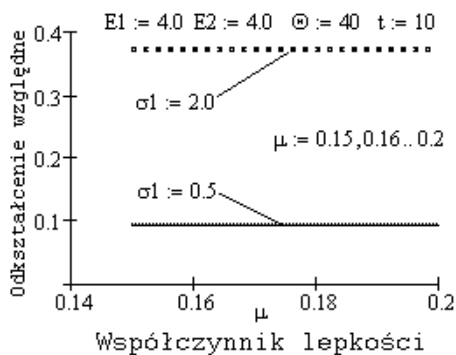
$$L = \frac{\mu \sigma_m}{E_2}.$$

Na rysunkach 3-8 przedstawiono wykresy będące graficznymi rozwiązaniami równań (7) i (8) w przypadku spełnienia warunków (5) i (6).



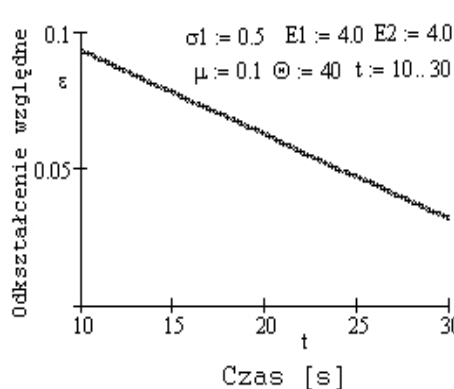
Rys. 3. Zależność odkształcenia  $\mathcal{E}$  od naprężenia  $\sigma_m = \sigma_1$  dla obciążenia udarowego

Fig. 3. The dependence of deformation  $\mathcal{E}$  from tension  $\sigma_m = \sigma_1$  for percussive load



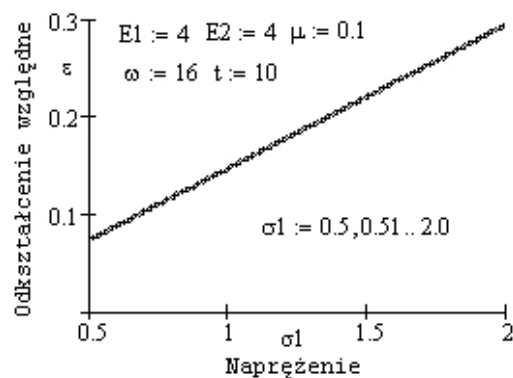
Rys. 4. Zależność odkształcenia  $\mathcal{E}$  od współczynnika lepkości  $\mu$  dla obciążenia udarowego

Fig. 4. The dependence of deformation  $\mathcal{E}$  from viscosity coefficient  $\mu$  for percussive load



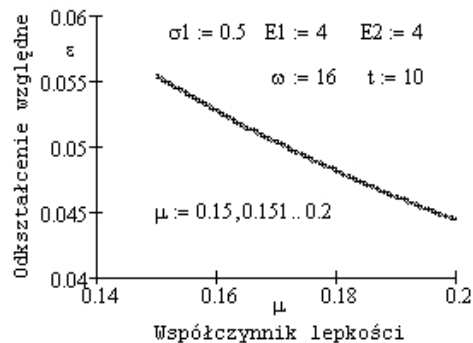
Rys 5. Zależność odkształcenia  $\mathcal{E}$  od czasu  $t$  dla obciążenia udarowego

Fig. 5. The dependence of deformation  $\mathcal{E}$  from time  $t$  for percussive load



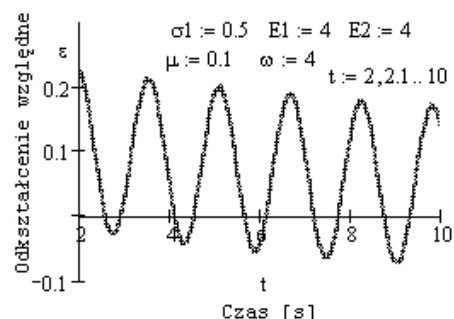
Rys. 6. Zależność odkształcenia  $\mathcal{E}$  od naprężenia przy obciążeniu okresowym

Fig. 6. The dependence of deformation  $\mathcal{E}$  from tension for periodical load



Rys. 7. Zależność odkształcenia  $\varepsilon$  od lepkości  $\mu$  przy obciążeniu okresowym

Fig. 7. The dependence of deformation  $\varepsilon$  from viscosity  $\mu$  for periodical load



Rys. 8. Zależność odkształcenia  $\varepsilon$  od czasu  $t$  przy obciążeniu okresowym

Fig. 8. The dependence of deformation  $\varepsilon$  from time  $t$  for periodical load

## Wyniki

1. Badania teoretyczne przyjętego modelu wskazują, że względne odkształcenie gleby zależy w przypadku obciążenia udarowego od:
  - wartości maksymalnego obciążenia działającego na glebę;
  - czasu rozplywu fali w glebie
2. Jak wynika z wykresu na rys. 4 względne odkształcenie w przypadku obciążenia udarowego nie zależy od lepkości gleby.
3. W przypadku obciążenia okresowego na względne odkształcenie gleby wpływ ma wartość maksymalnego naprężenia, lepkość ośrodka glebowego oraz czas działania obciążenia.

## Bibliografia

- Chigarev Yu., Romaniuk M., Nowowiejski R., Kostencki P. 2002. Dynamiczne oddziaływanie koła na glebę o właściwościach sprężysto-lepkich. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Teoretyczne i aplikacyjne problemy inżynierii rolniczej w aspekcie przystosowania do programów badawczych w UE”. 11-14 czerwca Polanica Zdrój. s. 85-88.
- Liachow G. M. 1982. Wołny w gruntach i poristych mnogokomponentnych sriedach. Nauka s. 288.

## **DEVELOPMENT OF THE “MACHINE – SOIL” RHEOLOGICAL MODEL**

**Abstract.** The paper presents a rheological model of an arrangement consisting of soil and a farm vehicle. Moreover, it describes concepts of this model for cases, when the vehicle wheel transmits impact loads and cyclically changing load.

**Key words:** rheological model of soil, stress, deformation

**Adres do korespondencji:**

Yuri Chigarev; e-mail: [jchigarev@agro.ar.szczecin.pl](mailto:jchigarev@agro.ar.szczecin.pl)  
Instytut Inżynierii Rolniczej  
Akademia Rolnicza w Szczecinie  
Ul. Papieża Pawła VI/1  
71-442 Szczecin