

FIZYCZNE I MATEMATYCZNE METODY BADAŃ W AGROFIZYCE

R.T. Walczak, J. Horabik

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: rwalczak@demeter.ipan.lublin.pl

Streszczenie: W pracy omówiono fizyczne i matematyczne metody badań stosowane w agrofizyce. Rozważono modele rzeczywiste, analogowe, teoretyczne fizyczno-matematyczne i fenomenologiczne. Omówiono modelowanie procesów wymiany masy i energii w systemie gleba - roślina - atmosfera. Jako przykład praktycznego zastosowania termodynamicznego opisu procesu w agrofizyce omówiono opis kształtowania się wilgotności w heterogenicznym profilu glebowym. Jako przykład fenomenologicznego modelu konstruowanego w przypadku, kiedy rzeczywisty proces lub zjawisko jest na tyle złożone, że opisanie wszystkich mechanizmów mających wpływ na ich przebieg jest trudne lub wręcz niemożliwe rozważono model przewidywania plonów. Omówiono modelowanie właściwości reologicznych dających możliwość precyzyjnego określania stanu odkształcenia i naprężenia w glebie bądź też w tkance roślinnej w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych. Modelowanie takie umożliwia szybką ocenę stopnia dojrzałości owoców i warzyw, wpływu warunków przechowywania oraz odporności na różnego rodzaju obciążenia mechaniczne. Przykładem adaptacji w badaniach agrofizycznych modeli sformułowanych przez inne nauki przyrodnicze może być molekularno - mechaniczna teoria tarcia Kragielskiego stosowana coraz częściej do opisu tarcia w materiałach pochodzenia roślinnego. Makroskopowe zachowanie się wielu ciał jest bardzo często powiązane z oddziaływaniami zachodzącymi w skali mikro. Jako przykład łącznego modelowania oddziaływań w skali makro i mikro omówiono oddziaływania zachodzące w materiałach sypkich oraz stosowane do ich opisu modele mikrostrukturalne. Omówiono nowoczesne metody szybkiego i dokładnego określania jakości plodów rolnych oparte na pomiarze wielu właściwości fizycznych, które dobrze korelują ze wskaźnikami jakości badanych materiałów.

Słowa kluczowe: agrofizyka, fizyczne i matematyczne modele, środowisko przyrodnicze, produkty rolnicze

WSTĘP

Agrofizyka jest dziedziną nauki zajmującą się badaniem procesów fizycznych i fizyko - chemicznych związanych z wymianą masy i energii w systemie gleba - roślina - atmosfera oraz procesów związanych ze zbiorem, transportem, i przechowywaniem materiałów rolniczych [31]. Główną cechą tych badań jest aplikowanie fizyki w badaniach rolniczych wraz z właściwym jej warsztatem badawczym i interpretacyjnym. Specyficzną cechą obiektów agrofizycznych jest ich różnorodność: system gleba-roślina-atmosfera, ciała kapilarno-koloidalno-porowate, ciała o budowie komórkowej i tkankowej.

Charakterystyczną cechą parametrów systemu gleba-roślina-atmosfera jest ich zmienność czasowo-przestrzenna oraz występująca aktywność biologiczna. Dlatego też w agrofizyce do zbierania, analizy i interpretacji danych wykorzystuje się metody geostatystyczne [30,35].



Rys. 1. Agrofizyka w badaniach geofizycznych.

Fig. 1. Agrophysics in relation to geophysical sciences.

Fizyka ze swoim warsztatem naukowo-badawczym znalazła zastosowanie w różnych dziedzinach badań, co spowodowało powstanie nowych interdyscyplinarnych dziedzin nauki takich jak astrofizyka, geofizyka, fizyka atmosfery, fizyka środowiska w tym agrofizyka (Rys. 1). Rozwój fizyki środowiska pozwolił na opisywanie, modelowanie i przewidywanie procesów zachodzących w środowisku życia i działalności człowieka.

Agrofizyka jako integralna część fizyki środowiska dotyczy badań nad rolniczym wykorzystaniem terenu oraz produkcji żywności. Pomimo, że w skali globu tereny użytkowane rolniczo zajmują około 30%, a grunty orne około 10% to należy zaznaczyć, że jest to obszar użytkowany bardzo intensywnie ze wszystkimi tego konsekwencjami (erozja, zanieczyszczenie środowiska itd.).

MODELOWANIE W NAUKACH PRZYRODNICZYCH

W agrofizyce, jak każdej dziedzinie nauk przyrodniczych, podstawową metodą opisu obiektów badań jak też zjawisk i procesów fizycznych w nich zachodzących jest modelowanie.

Pod pojęciem modelu rozumiemy zespół założeń upraszczających opis danego obiektu fizycznego, procesu lub zjawiska ujmującego najważniejsze własności obiektu badań i przedstawiający go w ten sposób, że pewien obiekt, proces lub zjawisko, które na ogół w rzeczywistości nie istnieje, ma cechy dostatecznie zbliżone do rzeczywistego obiektu badań [3]. W zależności od sposobu opisu przez model badanego procesu fizycznego mogą one być podzielone na następujące grupy: modele rzeczywiste, analogowe, teoretyczne fizyczno-matematyczne i fenomenologiczne.

Z modelami rzeczywistymi spotykamy się w praktyce zawsze podczas prowadzenia eksperymentów zarówno polowych jak też laboratoryjnych. Poletko doświadczalne jest modelem pola uprawnego w zmniejszonej skali. Prowadzenie eksperymentów polowych w warunkach kontrolowanych (np. kontrolowany poziom nawożenia, nawadniania) też ma charakter badań modelowych. Badania lizymetryczne i wazonowe są również przykładami rzeczywistych badań modelowych. Modelem rzeczywistym może być szklarnia. Pozwala ona na prowadzenie badań w ściśle kontrolowanych warunkach nawożeniowych, nawodnieniowych i mikroklimatycznych.

Wiele badań laboratoryjnych prowadzi się na zminiaturyzowanych obiektach (modelach). Przykładem może być kolumna glebowa z zainstalowanymi sensorami do pomiaru wilgotności i potencjału wody glebowej, zasolenia i temperatury [14,15,27].

Modele analogowe bardzo rozpowszechnione w okresie poprzedzającym rozwój mikroprocesorów pozwalają na opis danego obiektu, zjawiska czy procesu fizycznego innym analogicznym obiektem, zjawiskiem czy procesem fizycznym. Np. w modelu elektrycznym symulującym procesy glebowe prąd elektryczny

przeplewający przez układ oporników i kondensatorów analoguje przepływ i akumulację masy i energii w glebie [19].

W metodzie pomiaru wydatku dyfuzji tlenu w glebie fizjologiczny proces jego konsumpcji przez korzenie roślin analogowany jest elektrochemicznym procesem jego redukcji na elektrodzie platynowej [17].

Rozwój metod numerycznych i komputeryzacji pozwolił na konstrukcję fizyczno-matematycznych modeli umożliwiających symulowanie rzeczywistych procesów zachodzących w systemie gleba - roślina - atmosfera. Modele takie charakteryzują się tym, że do opisu fizycznych procesów używa się konstytutywnych równań fizycznych. Rozwiązując w sposób analityczny lub numeryczny te równania możemy, na podstawie wprowadzonych warunków początkowych i brzegowych, przewidzieć zachowanie się danej wielkości fizycznej w czasie i przestrzeni.

WYMIANA MASY I ENERGII

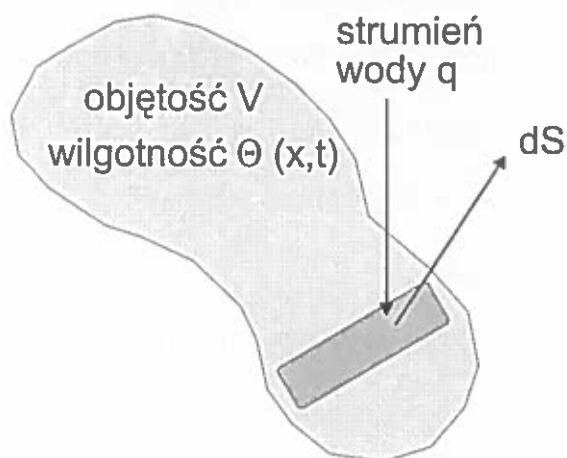
Modelowanie procesów wymiany masy i energii w systemie gleba - roślina - atmosfera wymaga uwzględnienia wielu zjawisk. Konstruując taki model korzysta się z praw fizycznych, a także ze stwierdzonych zależności empirycznych. Podstawowymi zasadami które musi spełniać taki model to zasady zachowania masy i energii w układzie wyrażone równaniami ciągłości [3]. Modelując proces przepływu wody w systemie gleba-roślina-atmosfera należy uwzględnić jej dodatnie i ujemne źródła w profilu glebowym. System drenów znajdujący się w glebie może stanowić zarówno dodatnie źródło wody w procesie nawadniania gleby, jak również ujemne źródło w procesie jej odwadniania. System korzeniowy jest ujemnym źródłem wody, którego wydajność zależy zewnętrznym warunków agroklimatycznych i okresy fenologicznego rośliny, a rozmieszczenie tych źródeł związane jest z przestrzennym usytuowaniem systemu korzeniowego w profilu glebowym. Najbardziej spektakularnym przykładem takiego modelu jest model przepływu wody w profilu glebowym.

Do opisu tego procesu wykorzystuje się zasadę zachowania masy (Rys. 2.) wyrażoną równaniem ciągłości, które dla pola bezźródłowego ma postać:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right) + \nabla \cdot \vec{q} = 0 \quad (1)$$

a dla pola ze źródłami postać następującą:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right) + \nabla \cdot \vec{q} = f(\vec{r}, t) \quad (2)$$



Rys. 2. Zasada zachowania masy w objętości gleby. Wilgotność w objętości V ulega zmianie tylko wtedy, gdy istnieje wypadkowy niezerowy strumień wody $q dS$ przez powierzchnię S ograniczającą objętość V [23].

Fig. 2. Mass conservation principle for soil. Volumetric moisture content changes if the resultant water flux $q dS$ through the surface S surrounding the volume V is not zero.

Porównując równanie ciągłości dla pola ze źródłami z równaniem Darcy przepływu wody w strefie nienasyconej:

$$\vec{q} = K(\Theta) \cdot \text{grad}\Psi \quad (3)$$

otrzymamy równanie Richardsa w postaci:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\nabla \cdot K(\Theta) \cdot \text{grad}\Psi + F(\vec{r}, t) \quad (4)$$

gdzie:

q – strumień wody,

$K(\Theta)$ – współczynnik przewodnictwa wodnego w strefie nienasyconej,

Θ – wilgotność,

Ψ – potencjał wody glebowej,

$F(r, t)$ – funkcja źródłowa (np. pobór wody przez korzenie roślin, nawadniająco-odwadniająca systemy drenażowe).

Równanie (5) opisuje dynamikę wilgotności w ośrodku kapilarno-porowatym w warunkach izotermicznych gdzie transport odbywa się pod wpływem gradientu potencjału wody. W warunkach nieizotermicznych woda przemieszcza się również pod wpływem gradientu temperatury. Pod wpływem tych gradientów, woda może przemieszczać się w postaci pary lub cieczy. W ogólności równanie przepływu wody w ośrodku kapilarno-porowatym ma postać:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\nabla \cdot ((D_{\Theta l} + D_{\Theta v}) \nabla \Theta) - \nabla \cdot ((D_{Tl} + D_{Tv}) \nabla T) - \nabla K \quad (5)$$

W analogiczny sposób można przedstawić równanie przepływu ciepła:

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \nabla \cdot (D_{\Theta v} \nabla \Theta) \quad (6)$$

oraz równanie przepływu soli:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) - \nabla \cdot (v \cdot C) \quad (7)$$

gdzie:

c_v – pojemność cieplna,

T – temperatura,

t – czas,

λ – przewodnictwo temperaturowe,

L – ciepło przejścia fazowego ciec-z-gaz,

Θ – wilgotność,

$D_{\Theta v}$ – współczynnik dyfuzji pary w warunkach izotermicznych,

$D_{\Theta l}$ – współczynnik dyfuzji cieczy w warunkach izotermicznych,

D_{Tv} – współczynnik dyfuzji pary w warunkach nieizotermicznych,

D_{Tl} – współczynnik dyfuzji pary w warunkach nieizotermicznych,

C – koncentracja soli,

D – współczynnik dyfuzji i dyspersji hydrodynamicznej.

Równania (5), (6), (7) dynamiki wilgotności, temperatury i koncentracji soli są ze sobą powiązane poprzez gradienty poszczególnych wielkości fizycznych. Korzystając z praw termodynamiki można te równania uogólnić wyrażeniem:

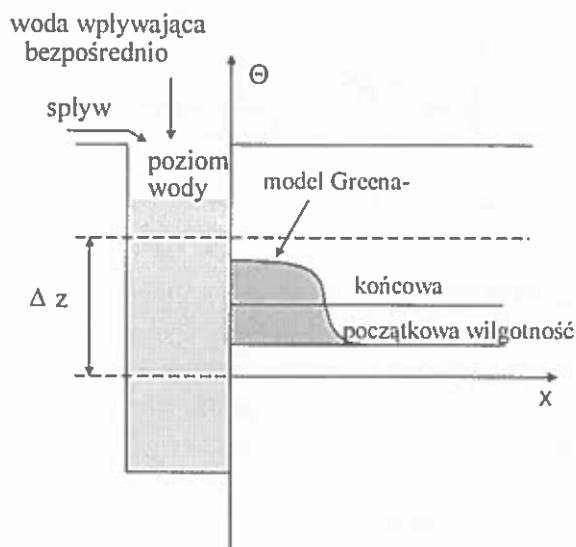
$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k \quad (8)$$

w którym stacjonarne strumienie termodynamiczne J_i są jednorodnymi, liniowymi funkcjami sił termodynamicznych X_k . Współczynniki L_{ik} , które w ogólności zależą od temperatury, wilgotności, koncentracji soli itp. noszą nazwę współczynników kinetycznych. Współczynniki kinetyczne spełniają następujące warunki symetrii:

$$L_{ik} = L_{ki} \quad (9)$$

Powyższa zasada nosi nazwę zasady Onsagera.

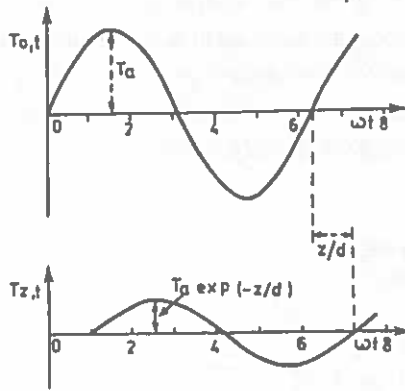
Udział poszczególnych strumieni, w transporcie wody w ciałach kapilarno-porowatych, ma duży wpływ na kształtowanie się temperatury i koncentracji soli, ponieważ strumieniowi pary towarzyszy przepływ energii przejścia fazowego gaz-ciecz (ciepło parowania), a sole są transportowane wraz ze strumieniem cieczy [32]. Strumień wody w postaci pary ma istotne znaczenie przy niższych wilgotnościach.



Rys. 3. Schemat przedstawiający sposób modelowania zjawiska przepływu preferencyjnego w glebie [34].

Fig. 3. Scheme of modelling of the preferential flow in soil [34].

Praktycznym przykładem zastosowania termodynamicznego opisu procesu w agrofizyce jest opis kształtowania się wilgotności w heterogenicznym profilu glebowym zbudowanym z poziomych homogenicznych warstw, w którym w warunkach naturalnych występują makropory zarówno pochodzenia biologicznego (biopory) jak też powstałe w wyniku fizycznego procesu pęcznienia i kurczenia gleby (Rys. 3). Wysokie przewodnictwo hydrauliczne takiego układu uniemożliwia zastosowanie jednowymiarowego równania Richardsa. Opracowany model preferencyjnego przepływu wody w profilu glebowym, w którym jako człon źródłowy w równaniu Richardsa wykorzystano model Greena-Ampt do opisu poziomej redystrybucji wody z makroporu do matrycy glebowej [34] pozwolił na opisanie kształtowania się warunków wilgotnościowych w tak złożonym układzie.



Rys. 4. Cykliczne zmiany temperatury na powierzchni gleby i na głębokości z [36].

Fig. 4. Cycling variation of temperature at soil surface and at depth z [36].

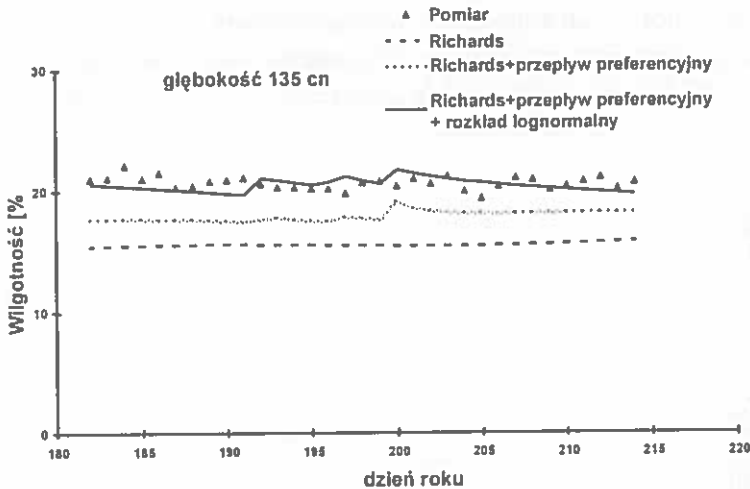
Ze względu na złożony charakter procesów przepływu i kształtowania się, w warunkach naturalnych, stanu termodynamicznego układu, stosuje się badania modelowe polegające na wprowadzeniu uproszczeń, które dla wybranych celów badawczych pozwalają opisać zmiany stanu układu z zadowalającą dokładnością. Przykładem takiego procesu jest kształtowanie się pola temperatury w profilu glebowym, którego zmienność w czasie i przestrzeni zależy od wielu zjawisk zachodzących w glebie oraz od warunków atmosferycznych stanowiących w tym układzie warunki brzegowe. W takim przypadku obserwowaną dzienną cykliczność zmian temperatury w profilu glebowym otrzymuje się rozwiązując równanie przepływu ciepła, przy założonym periodycznym warunku brzegowym na powierzchni gleby, w postaci funkcji opisującej falę o malejącej amplitudzie (Rys. 4):

$$T_{z,t} = T_0 - c \cdot z + T_a \cdot e^{-\frac{z}{d}} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{z}{d}\right) \quad (10)$$

która odzwierciedla zmiany temperatury w profilu glebowym w czasie i przestrzeni, gdzie:

- $T_{z,t}$ – temperatura na głębokości z w chwili t ,
- T_0 – temperatura powietrza,
- d – głębokość profilu glebowego,
- T_a – temperatura na powierzchni gleby,
- c – współczynnik zmian temperatury z głębokością,
- t – czas,
- z – współrzędna.

Ten sinusoidalny model spełnia warunki zmniejszania się amplitudy i przesunięcia fazowego temperatury wraz z głębokością.



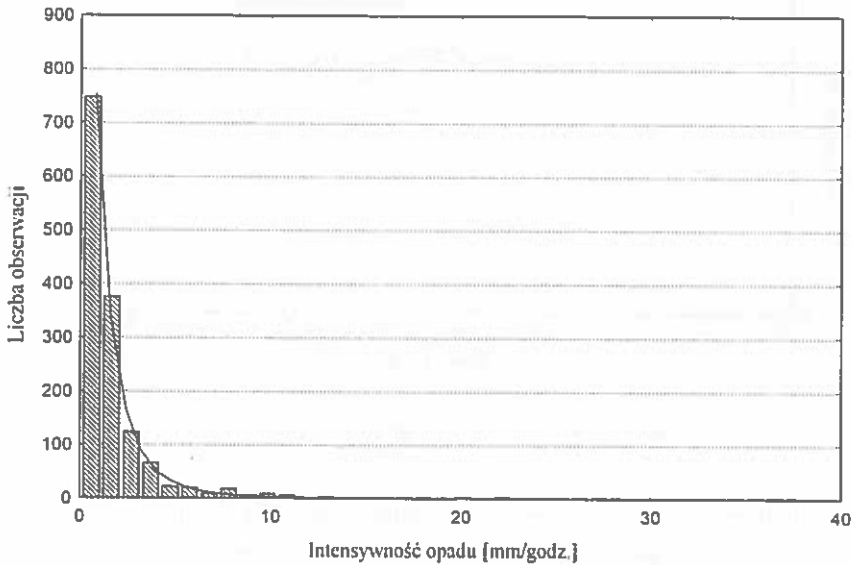
Rys. 5. Zmierzone i wyliczone z modelu wartości wilgotności [33].

Fig. 5. Measured and calculated values of water content [33].

Przykładem realizacji typowego dla badań fizycznych procesu badawczego jest doskonalenie modelu przepływu preferencyjnego i jego eksperymentalna weryfikacja (Rys. 5). Postawiony problem badawczy dotyczył możliwości modelowania dystrybucji wody w profilu glebowym w warunkach naturalnych. Postawiono wstępną hipotezę, że proces ten można opisać przy pomocy jednowymiarowego równania Richardsa. Sprawdzono doświadczalnie postawioną hipotezę i stwierdzono znaczne rozbieżności pomiędzy wartościami zmierzonymi wilgotności, a wartościami predyktowanymi przez model (Rys. 5) (linia przerywana). Dokonano korekty hipotezy przez dołączenie submodelu przepływu preferencyjnego (Rys. 4).

Ponownie dokonano eksperymentalnej weryfikacji postawionej hipotezy. Zgodność pomiędzy zmierzonymi i wyliczonymi przez model wartościami wilgotności uległa poprawie (Rys. 5) (linia ciągła-szara), jednakże wyliczone przez model wilgotności miły zawsze niższą wartość niż wilgotności zmierzone. Założona w modelu intensywność opadu jako stała wartość w ciągu doby odbiegała od rzeczywistych wartości intensywności występujących podczas opadów i nie przewyższała możliwości infiltracyjnych gleby, co sprawiało, że spływ po-

wierzchniowy jako podstawowy element wystąpienia zjawiska przepływu preferencyjnego nie mógł wystąpić. Przeprowadzona analiza opadów pozwoliła na postawienie hipotezy, że rozkład intensywności opadu jest charakterystyczny dla danego miejsca i pory roku i może być aproksymowany rozkładem lognormalnym. Ponownie skorygowano więc hipotezę poprzez wprowadzenie submodelu opisującego rozkład intensywności opadu rozkładem lognormalnym (Rys. 6).



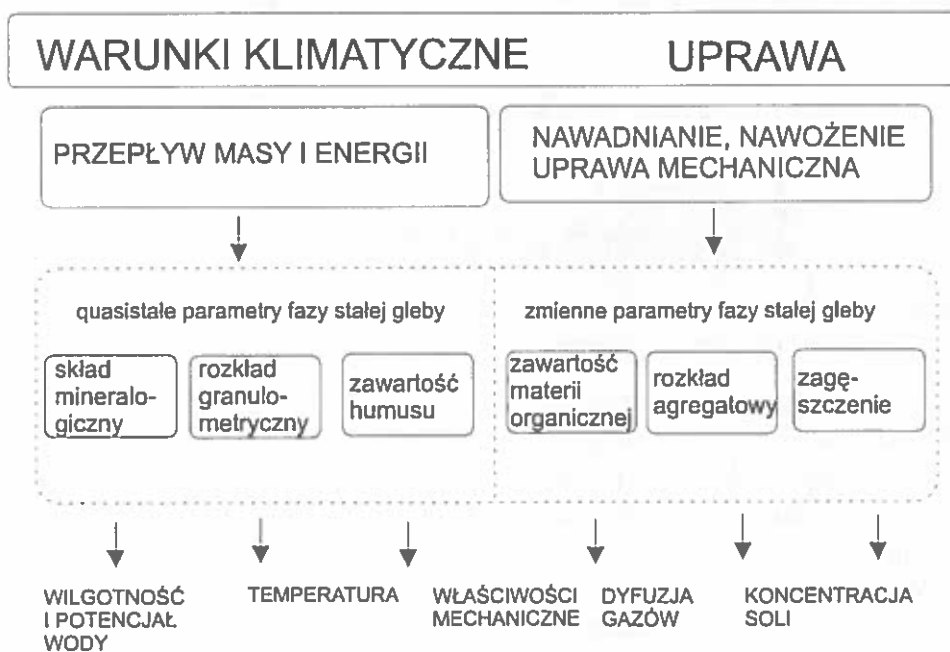
Rys. 6. Sposób modelowania intensywności opadu rozkładem lognormalnym [17].

Fig. 6. Modelling of intensity of precipitation by the lognormal frequency distribution [17].

Modele fenomenologiczne konstruuje się w przypadku, kiedy rzeczywisty proces lub zjawisko jest na tyle złożone, że opisanie wszystkich mechanizmów mających wpływ na ich przebieg jest trudne lub wręcz niemożliwe. Korzysta się wtedy z równań empirycznych, gdzie współczynniki określane są na drodze eksperymentalnej. Zazwyczaj modele takie wchodzi w skład modeli mieszanych np. teoretyczno - fenomenologicznych. Przykładem takiego modelu jest model przewidywania plonów. Model taki zawiera wiele składowych fizyczno-matematycznych symulujących różne procesy zachodzące w systemie gleba - roślina - atmosfera, zawiera także czynniki empiryczne określane na drodze doświadczalnej. Modelowanie zjawiska ewapotranspiracji i erozji glebowej to przykłady modeli fenomenologicznych. Również przyrost całkowitej biomasy modelowany jest przy pomocy modelu fenomenologicznego.

MODELOWANIE WARUNKÓW ROZWOJU ROŚLIN

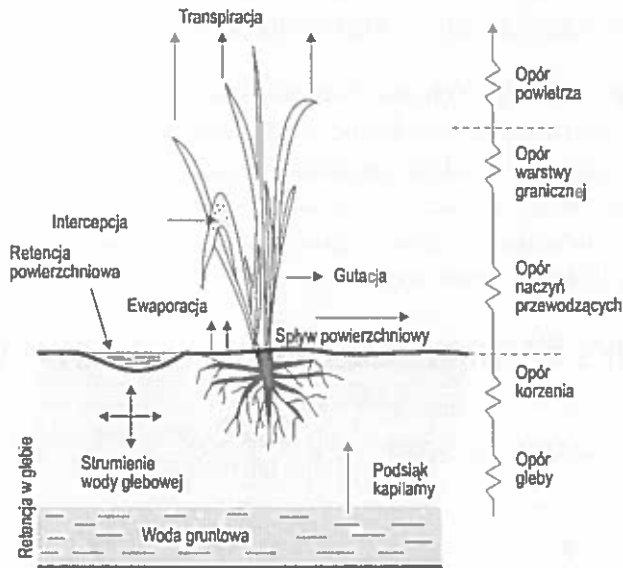
O warunkach rozwoju systemu korzeniowego roślin decydują: dostępność, akumulacja i możliwość przewodzenia wody, ciepła oraz soli, a także dyfuzja gazów w glebie [7]. Na przebieg procesów fizycznych w glebie wpływają właściwości jej fazy stałej. Część właściwości jest niezmienna i charakterystyczna dla danej gleby, natomiast parametry zmienne można kształtować poprzez dobór odpowiednich zabiegów uprawowych (Rys. 7).



Rys. 7. Czynniki kształtujące warunki wzrostu i rozwoju roślin.

Fig. 7. Factors influencing conditions of plants growth and development.

W procesie transpiracji, roślina jest elementem przez który następuje przepływ wody z gleby do atmosfery (Rys. 8.) [13]. Dlatego też w modelach wzrostu, rozwoju i plonowania roślin wprowadza się parametry charakteryzujące roślinę oraz jej rozwój. Pomiar fizycznych, a szczególnie fizjologicznych charakterystyk roślin napotyka na wiele trudności. Ponieważ procesy fizyczne i fizjologiczne zachodzące w roślinie są pochodną warunków klimatycznych i aktualnie panujących w glebie warunków wilgotnościowych i termicznych, dlatego też wiele parametrów i charakterystyk rośliny opisuje się przy pomocy parametrów klimatycznych i glebowych wykorzystując równania empiryczne. Istnieją również wiel-



Rys. 8. Elementy systemu gleba-roślina-atmosfera [20].

Fig. 8. Elements of the soil-plant-atmosphere system [20].

kości charakteryzujące stan fizyczny rośliny w jej poszczególnych fazach fenologicznych, które można zmierzyć bezpośrednio. Przykładami parametrów i charakterystyk rośliny występującymi w modelach plonowania roślin są: maksymalna wysokość rośliny, współczynnik powierzchni liści, maksymalny zasięg korzeni, itp.

W Instytucie Agrofizyki PAN opracowano metodę i aparaturę do pomiaru wilgotności gleby opartą na metodzie reflektometrii w domenie czasu TDR (Time Domain Reflectometry) [14,16]. Metoda ta oparta jest na pomiarze prędkości rozchodzenia się impulsu elektromagnetycznego w badanym ośrodku, która zależy od stałej dielektrycznej tego ośrodka. Woda ma względną stałą dielektryczną (około 81), dużo większą od względnej stałej dielektrycznej fazy stałej gleby (około 4) i powietrza glebowego (około 1). Zawartość wody istotnie modyfikuje stałą dielektryczną gleby, a zatem wpływa na prędkość propagacji w niej fali elektromagnetycznej. Aparat mierzy czas rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w umieszczonej w wybranej warstwie gleby sondzie stanowiącej falowód.

W oparciu o technologię TDR, oprócz prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie, która odzwierciedla jej wilgotność, możemy również mierzyć, tym samym czujnikiem, elektryczną konduktywność gleby, która odzwierciedla jej zasolenie [18].

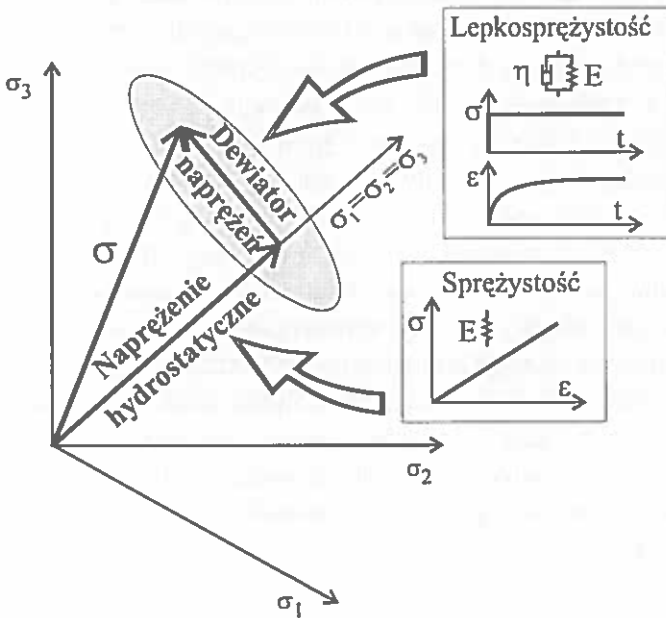
WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE PŁODÓW ROLNYCH

Reologia materiałów rolniczych stanowi od dawna jeden z obszarów dużego zainteresowania agrofizyki. Badania te koncentrują się na ważnych dla rolniczego środowiska produkcyjnego zagadnieniach mechaniki ośrodka glebowego, istotnych ze względu na możliwość przewidywania skutków zagęszczania gleby przez maszyny rolnicze, oraz na właściwościach mechanicznych materiałów roślinnych. Właściwości fizyczne gleby uzależnione są w znacznym stopniu od jej wilgotności. Mechaniczne właściwości gleby, jak plastyczność, lepkość, zwięzłość oraz pęcznienie i kurczenie zmieniają się wraz z jej wilgotnością. Tak np. gleba sucha zachowuje się podobnie jak ciało sztywne, krusząc się przy dostatecznie dużym nacisku, natomiast gleba wilgotna może wykazywać zdolność do plastycznego odkształcania. Z kolei w przypadku materiałów roślinnych właściwości mechaniczne zależą silnie od potencjału wody. Parametry mechaniczne tkanki roślinnej takie jak: moduł sprężystości, lepkość i wytrzymałość mechaniczna są silnie skorelowane z potencjałem wody, który zmienia się wraz ze stanem dojrzałości oraz warunkami i czasem przechowywania. Znajomość właściwości reologicznych daje możliwość precyzyjnego określania stanu odkształcenia i naprężenia w glebie bądź też w tkance roślinnej w warunkach obciążeń statycznych i dynamicznych. Umożliwia szybką ocenę stopnia dojrzałości owoców i warzyw, wpływu warunków przechowywania oraz odporności na obciążenia mechaniczne [1,6,10,24].

Liczne badania wskazują, że w przypadku materiałów roślinnych o stosunkowo małej zawartości przestrzeni powietrznych odkształcenie objętościowe, wywołane naprężeniem hydrostatycznym (izotropowym), można potraktować jako sprężyste, zaś odkształcenie postaciowe, wywołane naprężeniem dewiatorowym, jako lepkosprężyste (Rys. 9). Przyjęcie nawet tak prostego przybliżenia pozwala z dobrą dokładnością modelować reakcję owoców i warzyw na różnego rodzaju obciążenia, statyczne i dynamiczne. Pozwala również przewidzieć graniczną prędkość deformacji, powyżej której następuje uszkodzenie tkanki [8]. Umożliwia weryfikację prostych testów do szybkiego określania tzw. „kondycji fizycznej” produktów rolniczych.

Liczne badania wskazują, że w przypadku materiałów roślinnych o stosunkowo małej zawartości przestrzeni powietrznych odkształcenie objętościowe, wywołane naprężeniem hydrostatycznym (izotropowym), można potraktować jako sprężyste, zaś odkształcenie postaciowe, wywołane naprężeniem dewiatorowym, jako lepkosprężyste (Rys. 9). Przyjęcie nawet tak prostego przybliżenia

przybliżenia pozwala z dobrą dokładnością modelować reakcję owoców i warzyw na różnego rodzaju obciążenia, statyczne i dynamiczne. Pozwala również przewidzieć graniczną prędkość deformacji, powyżej której następuje uszkodzenie tkanki [8]. Umożliwia weryfikację prostych testów do szybkiego określania tzw. „kondycji fizycznej” produktów rolniczych.



Rys. 9. Przykład modelowania właściwości reologicznych tkanki roślinnej.

Fig. 9. Modelling of rheological properties of plant tissue.

Z kolei modele nieliniowe, uwzględniające zależność lepkości od stanu naprężenia, umożliwiają bardziej precyzyjny opis czasowych przebiegów naprężenia i odkształcenia. Dopiero jednak modele oparte na mechanice statystycznej, które uwzględniają strukturę ośrodka i rzeczywiste oddziaływania między jego elementami, umożliwiają poprawną interpretację złożonych oddziaływań zachodzących w ośrodkach trójfazowych takich jak gleba czy tkanka roślinna [24,26,29].

ODDZIAŁYWANIA CIERNE W MATERIAŁACH ROŚLINNYCH

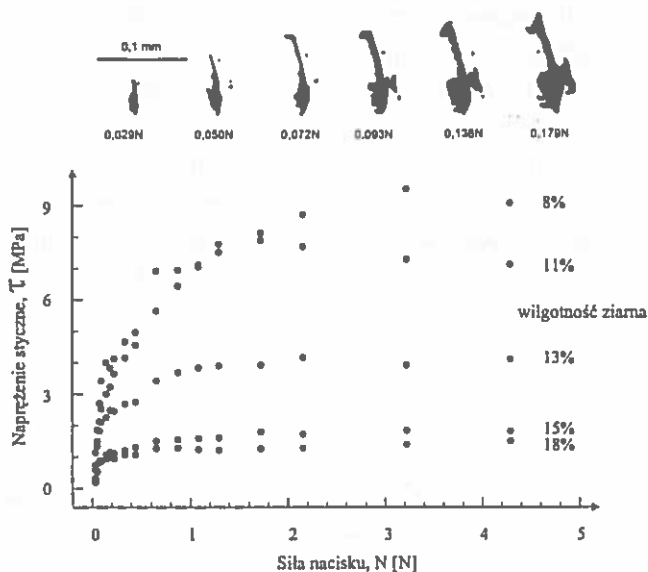
Przykładem adaptacji w badaniach agrofizycznych modeli sformułowanych przez inne nauki przyrodnicze może być molekularno - mechaniczna teoria tarcia

Kragielskiego. Jest ona coraz częściej stosowana do opisu tarcia w materiałach pochodzenia roślinnego [21,28]. Według tej teorii na elementarnej powierzchni styku trących się ciał występują opory ruchu wywołane powstawaniem więzi adhezyjnej oraz ścieraniem się mikronierówności powierzchni. Wypadkowy współczynnik tarcia μ pojedynczej nierówności jest sumą dwóch składowych: więzi adhezyjnej μ_a oraz deformacyjnej μ_d :

$$\mu = \mu_a + \mu_d = \frac{\tau_0}{p_r} + k_x + k_f \alpha \sqrt{\frac{h}{r}} \quad (11)$$

gdzie:

- τ_0 – wytrzymałość więzi adhezyjnej na ścinanie,
- p_r – naprężenie normalne na powierzchni kontaktu,
- k_x – współczynnik przyrostu więzi adhezyjnej ze wzrostem nacisku,
- k_f – współczynnik zależny od rodzaju deformacji,
- α – współczynnik strat histerezy,
- h – głębokość wnikania nierówności w płaską powierzchnię,
- r – promień krzywizny nierówności.



Rys. 10. Zależność naprężenia stycznego od nacisku normalnego na elementarnym obszarze kontaktu ziarna pszenicy z gładką powierzchnią [21].

Fig. 10. Shear stress as influenced by normal load at the true contact area of wheat grain with a smooth surface [21].

Model ten pozwala na poprawną interpretację oddziaływań, których nie dawało się wyjaśnić na gruncie prostszych modeli ze względu na dwoistą naturę tarcia. Pozwala przewidzieć między innymi nieliniową zależność współczynnika tarcia od mikrotwardości powierzchni oraz nacisku normalnego. Rozdzielenie wypadkowego tarcia na składową adhezyjną i deformacyjną jest uzasadnione zwłaszcza w przypadku tarcia materiałów roślinnych o gładką powierzchnię. Rysunek 10 ilustruje zależność naprężenia stycznego na elementarnym obszarze kontaktu ziarna pszenicy z gładką powierzchnią od nacisku normalnego. Naprężenie styczne, pochodzące w tym przypadku głównie więź adhezyjną, szybko stabilizuje się w miarę wzrostu nacisku normalnego. Całkowity opór tarcia wzrasta zatem głównie na skutek wzrostu pola powierzchni kontaktu.

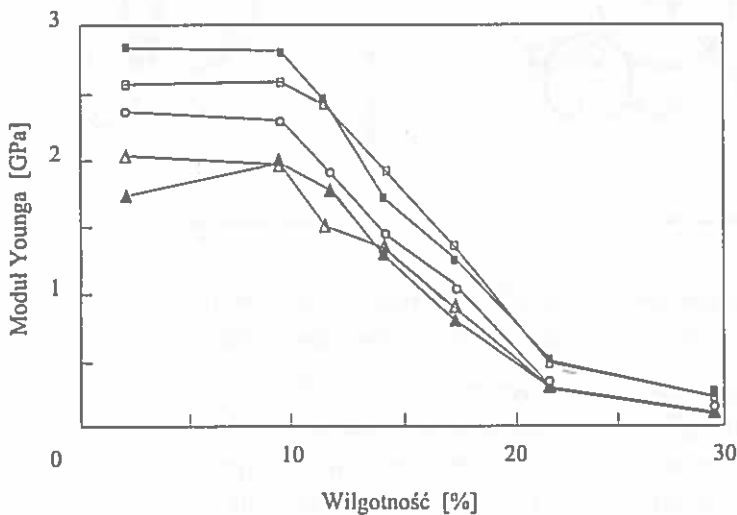
Szczegółowe badania doświadczalno-teoretyczne procesu tarcia wykazały, że zastosowany model opisuje poprawnie tarcie materiałów pochodzenia roślinnego o powierzchnie konstrukcyjne oraz pozwoliły przypisać poszczególnym składowym współczynnika tarcia jednoznacznie interpretację fizyczną [28]. Pierwszy składnik więzi adhezyjnej uwzględniający „szepność” trących powierzchni, zależy od rzeczywistej powierzchni kontaktu oraz mikrotwardości powierzchni, nie zależy natomiast od nacisku normalnego. Drugi składnik więzi adhezyjnej uwzględnia przyciąganie się stykających się powierzchni i zależy od prędkości poślizgu, czasu trwania kontaktu ciernego, mikrotwardości powierzchni materiału roślinnego i jest potęgową funkcją nacisku normalnego. Natomiast składowa deformacyjna współczynnika tarcia zależy od stałych materiałowych trących powierzchni, zawartości wody w materiale roślinnym i jest wprost proporcjonalna do nacisku normalnego. Model ten pozwala przewidzieć precyzyjnie wpływ wielu istotnych czynników na oddziaływania ciernie w materiałach pochodzenia roślinnego.

MODELOWANIE ODDZIAŁYWAŃ W MATERIAŁACH SYPKICH

Makroskopowe zachowanie się wielu ciał jest bardzo często powiązane z oddziaływaniami zachodzącymi w skali mikro. Zachodzi wtedy potrzeba łącznego modelowania oddziaływań w skali makro i mikro. Przykładem mogą być oddziaływania mechaniczne zachodzące w materiałach sypkich.

Wypadkowe odkształcenie materiału sypkiego powstaje w wyniku złożenia przemieszczeń, obrotów oraz deformacji poszczególnych ziaren. Udział tych trzech składników jest zależny od właściwości materiału oraz stanu naprężenia. Udział obrotów ziaren wzrasta w miarę zbliżania się do granicznego stanu naprę-

żenia. W przypadku materiałów pochodzenia biologicznego istotny jest udział deformacji ziaren ośrodka. Zależnie od wilgotności deformacja ta może być sprężysta, lekko-sprężysta bądź plastyczna. Problemem jest również szeroki zakres zmian właściwości. Przedstawiona na rysunku 11 zależność modułu sprężystości ziarna pszenicy od wilgotności dobrze ilustruje spotykany w rzeczywistości zakres zmian parametrów. Zmiana wilgotności ziarna o około 10% powoduje zmianę modułu sprężystości prawie o rząd wielkości.

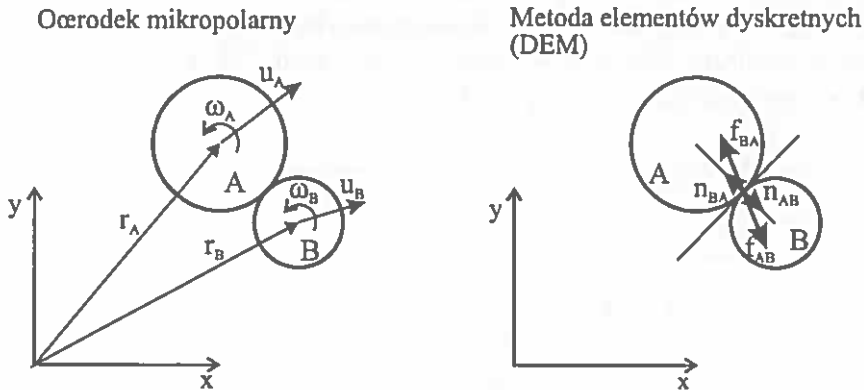


Rys. 11. Zależność modułu sprężystości ziarna pszenicy od wilgotności [5].

Fig. 11. Modulus of elasticity of wheat grain as influenced by moisture content [5].

Badania teoretyczne proponują kilka różnych metod analizy wpływu mikrostruktury [9,11,25]. Mechanika ośrodków ciągłych oferuje nieklasyczne modele mikrostrukturalne. Punktem wyjścia jest wprowadzenie ciągłych pól przemieszczenia i obrotów (Rys. 12). Pozwala to modelować strukturę ośrodka, którego ziarna podlegają przemieszczeniom i obrotom. Ośrodek taki nazywamy mikropolarnym. Badania ostatnich dwudziestu lat wskazują, że podobne wyniki można uzyskać podążając nieco inną drogą – od oddziaływań pomiędzy poszczególnymi ziarnami do makroskopowych właściwości materiału jak np. w metodzie elementów dyskretnych (DEM). Pierwszym krokiem tej metody jest wyznaczanie składowych tensora naprężenia w oparciu o rozkłady kierunków normalnych oraz rozkłady sił w punktach styku ziaren. Jeszcze inne możliwości stwarza rozważenie akumulacji energii w sprężystych kontaktach ziaren i rozpra-

zanie w kontaktach ciernych. Zastosowanie w tym podejściu formalizmu mechaniki kwantowej pozwala na znaczne uproszczenia obliczeniowe umożliwiając efektywny opis struktury i właściwości mechanicznych materiałów sypkich [9].



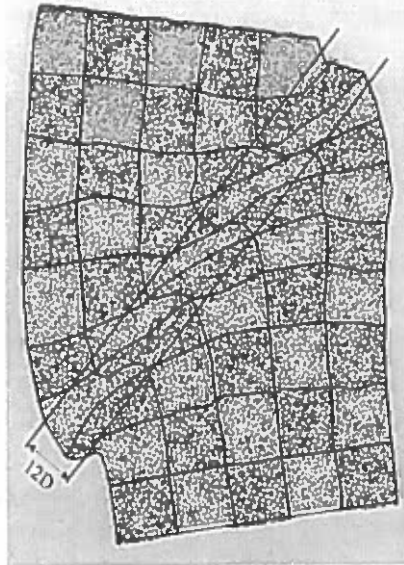
Rys. 12. Ośrodek mikropolarny oraz metoda elementów dyskretnych (DEM).

Fig. 12. The micropolar approach and the distinct element method (DEM).

Symulacje oddziaływań zachodzących w materiałach sypkich wykonane metodą DEM, uwzględniające modelowanie oddziaływań pomiędzy ziarnami poprzez lepko-sprężysty kontakt w kierunku normalnym oraz lepko-sprężysto-plastyczny w kierunku stycznym, wskazują na dużą uniwersalność i użyteczność tej metody [4,25]. Badania doświadczalne pozwalają wyposażyć omawiane modele w precyzyjne wartości parametrów opisujących elementarne oddziaływania takich jak: pole powierzchni kontaktu, moduł sprężystości, mikrotwardość, chropowatość, sztywność w kierunku normalnym i stycznym, wytrzymałość na ściskanie [21,28].

Modele z mikrostrukturą opisują znacznie szerszą klasę zagadnień niż modele makroskopowe. Przykładem zagadnienia wykraczającego poza zakres możliwości modeli klasycznych jest proces formowania się warstwy ścinania w materiale sypkim – czyli lokalizacja deformacji postaciowej (Rys. 13). Uwzględnienie obrotów ziaren, możliwe dopiero w ramach modeli z mikrostrukturą, pozwoliło wykazać, że grubość warstwy ścinania wyrażona w wymiarze ziaren ośrodka jest stała i mieści się w przedziale 8-12 średnic ziarna. Badania eksperymentalne przeprowadzone dla różnych materiałów sypkich potwierdziły tę prawidłowość [12]. Ma ona duże znaczenie praktyczne. Umożliwia na przykład ograniczenie

błędów skali powstających przy przenoszeniu wyników badań modelowych na obiekty o naturalnej skali wielkości.



Rys. 13. Lokalizacja warstwy ścinania w próbce materialu sypkiego podczas testu trójosiowego ściskania [12].

Fig. 13. Localization of the shear band in a sample of granular material during triaxial compression test [12].

BADANIA JAKOŚCI PŁODÓW ROLNYCH

W ostatnich trzydziestu latach powstało wiele nowych metod szybkiego i dokładnego określania jakości płodów rolnych. Metody te bazują na pomiarze bardzo wielu właściwości fizycznych, które korelują dobrze ze wskaźnikami jakości badanych materiałów. Duża grupa metod szybkiej oceny jędrność owoców i warzyw oparta jest na pomiarze cech mechanicznych takich jak: sprężystość, sztywność, częstotliwość rezonansowa czy parametry tłumienia drgań mechanicznych [2].

Wśród metod badania jakości płodów rolnych korzystających intensywnie z dorobku fizyki na szczególną uwagę zasługują nieniszczące metody badań. Metody optyczne, akustyczne, ultradźwiękowe, elektryczne, metody oparte o diagnostykę rentgenowską, magnetyczny rezonans jądrowy i wspomagane komputerową

komputerową analizą obrazu umożliwiającą szybką, nieniszczącą ocenę jakości plodów rolnych, stadium dojrzałości, składu chemicznego oraz detekcję uszkodzeń wewnętrznych. Szczególnie duże możliwości posiadają metody optyczne. Wykorzystanie rozpraszania światła laserowego jako miary dojrzałości owoców, jakości mięsa czy stadium dojrzałości sera to przykłady dużej uniwersalności metod optycznych.

EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA MODELI

Ostatni etap badań stanowi weryfikacja. Odbywa się to poprzez sprawdzanie logiczne, matematyczne i eksperymentalne poprawności wniosków szczegółowych wynikających ze sformułowanego modelu. Celem testów jest sprawdzenie, w jakiej mierze nowe konsekwencje sprawdzanego modelu (teorii) sprostać mogą wymaganiom praktyki, narzuconym bądź przez czysto naukowe sytuacje eksperymentalne, bądź przez praktyczne zastosowania. Eksperyment jest w naukach przyrodniczych ostateczną instancją popierającą lub dyskwalifikującą teorię. Każdy wynik eksperymentu zgodny z wnioskami płynącymi z teorii dostarcza tej teorii poparcia jedynie czasowego, ponieważ każdy późniejszy wynik negatywny może ją obalić. Słynne kryterium falsyfikowalności sformułowane przez Poppera [22] mówi: „teoria jest wtedy sensowna, gdy jest obalalna”. Pozytywny wynik weryfikacji otwiera drogę do praktycznych zastosowań. Wynik negatywny bywa często źródłem inspiracji do głębszych poszukiwań.

Zastosowanie zdobyczy fizyki i techniki w badaniach rolniczych zaowocowało opracowaniem całego szeregu metod pomiarowych i aparatury oraz znacznym postępem w rozwoju nowych technologii. Powstało wiele patentów krajowych i zagranicznych, na bazie których produkowana jest nowoczesna aparatura pomiarowa. Przykładem istotnych osiągnięć w zakresie fizyki roślin, dającym znaczne efekty gospodarcze w skali krajowej jest metoda ograniczania strat nasion rzepaku w trakcie zbioru kombajnowego, oparta na badaniach agrofizycznych zarówno samych roślin, jak i warunków ich zbioru.

Bardzo duże znaczenie praktyczne posiada poprawna interpretacja złożonych oddziaływań w obiektach biologicznych. Przykładem interpretacji, umieszczonej na liście wybitnych osiągnięć XX wieku w zakresie mechanizacji rolnictwa w Stanach Zjednoczonych, jest wyjaśnienie mechanizmów pęknięcia ziaren ryżu pod wpływem nagłych zmian wilgotności w ostatniej fazie dojrzewania.

PODSUMOWANIE

Wiedza o właściwościach fizycznych i procesach zachodzących w materiałach rolniczych zdobyta na drodze badań teoretycznych, a także coraz popularniejszych symulacji komputerowych, poddana gruntownej weryfikacji doświadczalnej, jest przedmiotem zainteresowania wielu specjalności rolniczych. Służy do interpretacji oddziaływań, projektowania, kontroli i optymalizacji procesów. Znajduje szerokie zastosowanie w ochronie środowiska, gleboznawstwie, uprawie roli i roślin, inżynierii rolniczej, technologii rolno-spożywczej i wielu innych.

PIŚMIENNICTWO

1. **Blahovec J.:** Physics of plant materials –an outlook. Mat. I Zjazdu Naukowego PTA, Lublin, 22-26, 1997.
2. **Chen P., Sun Z.:** A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products. J. agric. Engng Res., 49, 85-98, 1991.
3. Encyklopedia fizyki. PWN, Warszawa, 1973.
4. **Fawier J.:** Modelling flow and deformation of bulk particulate agricultural products. 3rd Int. Conference on Physics of Agro and Food Products. Lublin, 1998.
5. **Glenn G.M., Younce F.L., Pitts M.J.:** Fundamental physical properties characterizing the hardness of wheat endosperm. Journal of Cereal Science, 13, 179-194, 1991.
6. **Gliński J., Konstankiewicz K.:** Agrofizyka dla środowiska i bezpiecznej produkcji biologicznej. Acta Agrophysica, 20, 1999.
7. **Gliński J., Stępniewski W.:** Soil Aeration and its Role for Plants. CRC Press, USA, 1985.
8. **Golacki K.:** Charakterystyki lepkosprężyste korzeni marchwi w szerokim zakresie prędkości obciążeń mechanicznych. Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, 216, 1998.
9. **Gózdź A., Pietrow M.:** Quantum mechanical approach to randomly-packed beds of spheres in the container. Int. Agrophysics, 13, 185-189, 1999.
10. **Haman J.:** Znaczenie badań agrofizycznych i ich upowszechniania. Szkoła „Fizyka z elementami agrofizyki”, Lublin, 15-21, 1997.
11. **Haupt P.:** On the mathematical modelling of material behavior in continuum mechanics. Acta Mechanica, 100, 129-154, 1993.
12. **Horabik J., Łukaszuk J., Grochowicz M.:** Formation of shear band in a granular material during triaxial compression test. Int. Agrophysics, 14(3), 273-278, 2000.
13. **Kędziora A.:** Podstawy Agrometeorologii. PWRiL, Poznań, 1995.
14. **Malicki M.A.:** A reflectometric (TDR) meter of moisture content in soils and other capillary-porous materials. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 388, 107, 1990.

15. Malicki M.A., Plagge R., Renger M., Walczak R.T.: Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores. *Irrig. Sci.* 13, 65-72, 1992.
16. Malicki M.A., Skierucha W.: A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps rise-time needle pulse. *Irrig. Sci.* 10, 153-163, 1989.
17. Malicki M., Walczak R.: A gauge of the redox potential and the oxygen diffusion rate in the soil with an automatic regulation of cathode potential. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 220, II, 1983.
18. Malicki M.A., Walczak R.T.: Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. *European Soil Sci.*, 50, 505-514, 1999.
19. Malicki M., Walczak R., Witkowska B.: Electrical analogizing of the transport of water in the soil profile in the isothermal conditions. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 220, I, 1983.
20. Mazurek W.: Temperatura radiacyjna jako wskaźnik stresu wodnego roślin. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1997.
21. Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B.: Tarcie ziarna pszenicy. *Acta Agrophysica*, 4, 1995.
22. Popper K.R.: Logika odkrycia naukowego. PWN, Warszawa, 1977.
23. Potter D.: Metody obliczeniowe fizyki. PWN, Warszawa, 1977.
24. Pukos A.: Odkształcenia gleby w zależności od rozkładów porów i cząstek fazy stałej. *Problemy Agrofizyki*, 61, 1990.
25. Sakaguchi E., Kawakami S., Tobita F.: Simulation on flowing phenomena of grains by distinct element method. Report N. 94-G-025, AgEng, Milano, 1994.
26. Sobczuk H.A.: Opis stanu fizycznego gleby jako ośrodka nieuporządkowanego na przykładzie krzywych retencji wody. *Acta Agrophysica*, 11, 1998.
27. Sobczuk H.A., Plagge R., Walczak R.T., Roth Ch.H.: Laboratory equipment and calculation procedure to rapidly determine hysteresis of some soil hydrophysical properties under non steady flow conditions. *Z. Pflanz. Boden.*, 155, 157-163, 1992.
28. Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J.: Analiza teoretyczno-doświadczalna tarcia materiałów roślinnych. PTIR, Kraków, 1999.
29. Usowicz B.: Statystyczno-fizyczne modele przepływu masy i energii w ośrodku porowatym. *Acta Agrophysica*, 29, 2000.
30. Usowicz B., Walczak R.: Investigations and analyses of spatial variability of soil temperature. *Int. Agrophysics*, 6(1-2), 43-53, 1992.
31. Walczak R.: Nowe aspekty metrologii agrofizycznej. *Nauka Polska*, Nr 4, 1993.
32. Walczak R., Reszetin O., Czachor H.: Transport water and heat in soil. *Polish J. Soil Sci.*, VII, 1, 19-25, 1974.
33. Walczak R.T., Sławiński C., Kaszewski M.B.: The method of rainfall intensity estimation for runoff prediction. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, z. 419, 119-123, 1995.

34. Walczak R.T., Sławiński C., Sobczuk H., Gliński J.: Aspekt hydrologiczny w modelu EURO-ACCESS – Agroclimatic change and European Soil Suitability. Acta Agrophysica, 9, 1998.
35. Walczak R., Usowicz B.: Variability of moisture, temperature and thermal properties in bare soil and in crop field. Int. Agrophysics, 8(1), 161-168, 1994.
36. Wijk W.R. Van, de Vries D.A.: Periodic temperature variation in homogenous soil. (In) W. R. Wijk van (ed.), Physics of plant environment. J. Wiley and Sons., New York, 210-235, 1963.

PHYSICAL AND MATHEMATICAL METHODS OF INVESTIGATIONS IN AGROPHYSICS

R.T. Walczak, J. Horabik

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27
e-mail: rwalczak@demeter.ipan.lublin.pl

Summary. The paper describes the physical and mathematical method of investigations applied in agrophysics. The following groups of models were discussed: analogue models, theoretical-mathematical-physical models and phenomenological models. The paper presents modelling of the processes of mass and energy transfer in the soil-plant-atmosphere system. The model of water movement in the heterogeneous soil profile was indicated as an example of practical application of the thermodynamical description of processes in agrophysics. The model of crop yield is a good example of phenomenological models constructed when real process is too complicated for detailed physical-mathematical description. Modelling of the rheological properties allows to predict precisely the stress and strain in soil and plant tissues under static and dynamic loads. This models allows for quick evaluation of maturity of fruits and vegetables, influence of storage conditions and the resistance to mechanical loads. The micromechanical theory of friction by Kragelsky applied for plant materials was indicated as an example of models adopted from another natural sciences. Macroscopic behaviour of many objects is very often related to microscopic interactions. Development of microscopic constitutive models of granular materials is an example of global modelling of macro- and microscopic mechanical behaviour. Modern methods for quality evaluation and sorting of agricultural products based on the detection of various physical properties which correlate well with certain quality factors of the products were discussed.

Keywords: agrophysics, physical and mathematical models, environment, agricultural products.