

ROLA FIZYCZNYCH METOD BADAŃ ŚRODOWISKA NATURALNEGO I ŻYWNOCI

J. Horabik, R.T. Walczak

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

Streszczenie. W pracy omówiono fizyczne metody badań środowiska naturalnego i żywności stosowane w agrofizyce. Przedstawiono eksperymentalne metody badania hydro- i termofizycznych procesów w systemie gleba-roślina-atmosfera. Omówiono modelowanie procesów wymiany masy i energii w systemie gleba-roślina-atmosfera korzystające z zasad zachowania masy i energii oraz praw termodynamiki. Szczególną uwagę zwrócono na bezpośrednie i pośrednie metody pomiaru ewapotranspiracji. Omówiono zagadnienia metrologii agrofizycznej na przykładzie wykorzystanie teledetekcji do zdalnego pomiaru temperatury radiacyjnej pokrywy roślinnej w celu opracowania metody pomiaru warunków wodnych użytków zielonych i pól uprawnych w aspekcie sterowania systemami melioracji wodnych obszarów użytkowanych rolniczo. Przedstawiono wykorzystanie fizycznych metod badań do obniżenia strat ilościowych i jakościowych pól rolnych wynikających z niewłaściwej oceny wpływu stosowanych technologii zbioru, przetwarzania i obróbki. Rozważono aktualnie stosowane metody badania jakości pól rolnych oparte na pomiarze wielu różnych właściwości fizycznych, które dobrze korelują ze wskaźnikami jakości badanych materiałów. Zwrócono uwagę na modelowanie właściwości reologicznych dających możliwość szybkiej oceny stopnia dojrzałości owoców i warzyw, wpływu warunków przechowywania oraz odporności na różnego rodzaju obciążenia mechaniczne. Omówiono zagadnienia składowania ziarna i nasion roślin oleistych. Rozważono najistotniejsze czynniki technologiczne (temperaturę, czas, obciążenie) oraz parametry nasion (wilgotność, dojrzałość, ilość zanieczyszczeń) wpływające na utrzymanie jakości składowanych nasion rzepaku. Zwrócono również uwagę na właściwości roślinnych materiałów sypkich wpływające istotnie na przebieg procesów składowania, przemieszczania i przetwarzania tych materiałów.

Słowa kluczowe: agrofizyka, fizyczne metody badań, środowisko naturalne, płody rolne, żywność.

WSTĘP

Podjęmowane coraz powszechniej starania o zachowanie środowiska naturalnego w stanie umożliwiającym egzystencję przyszłym pokoleniom a także troska o jakość wytwarzanej żywności stawiają przed naukami przyrodniczymi coraz większe wyzwania. Obserwowana tendencja przechodzenia od rolnictwa intensywnego do zrównoważonego przy równoczesnym zachowaniu możliwie wysokich plonów roślin uprawnych stawia nowe wyzwania również przed agrofizyką.

Agrofizyka jako integralna część fizyki środowiska dotyczy badań nad rolniczym wykorzystaniem terenu oraz produkcji żywności skutecznie wspomaga rozwiązywanie złożonych zagadnień z zakresu rolnictwa [9]. W obszarze zainteresowania agrofizyki leżą oddziaływania fizyczne i fizykochemiczne zachodzące w systemie gleba-roślina-atmosfera oraz procesy związane ze zbiorem, transportem, przechowywaniem i przetwarzaniem materiałów rolniczych [8]. 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.).

Agrofizyka od swego początku korzystała bardzo intensywnie z warsztatu naukowego i dorobku nauk ścisłych - fizyki i matematyki. Postęp w fizycznych metodach badań materii, jaki dokonał się na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci, umożliwia lepsze zrozumienie właściwości i oddziaływań w obiektach, które są przedmiotem zainteresowania wielu nauk przyrodniczych [12].

Nauki przyrodnicze bardzo często stają przed koniecznością poszukiwania interdyscyplinarnej interpretacji wzajemnie powiązanych oddziaływań zachodzących w środowisku przyrodniczym. Badania prowadzone na tym samym obiekcie, ale w różnej skali wielkości, są bardzo często przedmiotem zainteresowania różnych dyscyplin naukowych: chemii (skala atomów, nm), biofizyki (skala komórek), fizyki (mm) bądź inżynierii (m). Wypadkowe oddziaływania nie są zazwyczaj prostą sumą oddziaływań zachodzących w różnej skali.

Coraz większe zapotrzebowanie na badania teoretyczne oraz interdyscyplinarną interpretację pozwalającą na pogłębione wyjaśnianie wzajemnie powiązanych oddziaływań spowodował w ostatnich latach intensywne poszukiwania w zakresie modelowania procesów zachodzących w układach fizycznych, chemicznych i biologicznych związanych z produkcją rolniczą. Modelowanie dokonuje pewnej idealizacji układu rzeczywistego uwzględniając tylko te oddziaływania, które odgrywają według nas istotną rolę. Modelowane procesy charakteryzuje zwykle duża różnorodność i zmienność czasowo-przestrzenna, a biorące w nich udział materiały niejednorodna budowa oraz aktywność biologiczna.

BADANIA HYDRO- I TERMOFIZYCZNYCH PROCESÓW W SYSTEMIE GLEBA-ROŚLINA-ATMOSFERA

Racjonalne dysponowanie naturalnymi zasobami wodnymi, przekształcanie ich w zasoby dyspozycyjne i ochrona przed zanieczyszczeniem ściśle wiąże się z obiegiem wody w biosferze. Jednym z najważniejszych obiektów decydujących o obiegu wody w biosferze jest gleba, która spełnia rolę dystrybutora wody przyjmując opady atmosferyczne, częściowo je retencjonując, częściowo przekazując do głębszych warstw i zasilając wody podziemne oraz oddając część wody atmosferze drogą parowania i transpiracji. Gleba również, wraz z nachyleniem terenu, decyduje o ilości wody spływającej po powierzchni. Zasadniczy wpływ na relacje pomiędzy składowymi bilansu wodnego odgrywają dwie właściwości gleby – jej pojemność i przepuszczalność. Znajomość tych właściwości, wpływu różnych czynników na ich kształtowanie oraz sposobów ich regulacji pozwala na sterowanie procesami obiegu wody w biosferze – może więc decydować o ilości wody w systemach rzecznych, powierzchniowych i podziemnych zbiornikach wodnych oraz zapewniać roślinom właściwe warunki rozwojowe z uwzględnieniem najbardziej efektywnego zużycia wody na ten cel. Szczególnie ważne jest to na obszarach użytkowanych rolniczo, gdzie ilość i stan energetyczny wody w glebie ma zasadniczy wpływ na wzrost i rozwój roślin, a ponadto istnieje możliwość zmian pojemności i przepuszczalności wodnej gleby poprzez zmianę takich jej właściwości fizycznych jak zagęszczenie i struktura, drogą stosowania odpowiednich zabiegów agrotechnicznych.

W agrofizyce można sformułować następujące główne trendy badań dotyczących hydro- i termofizycznych procesów zachodzących w systemie gleba-roślina-atmosfera:

- udoskonalenie termofizycznego opisu eksperymentalnych badań procesów transportu wody, roztworów i ciepła w ciałach kapilarno-koloidalno-porowatych, problem skali;
- modelowanie procesów hydro- i termofizycznych;
- termodynamiczny opis transportu masy i energii w żywych materiałach roślinnych posiadających strukturę komórkową i tkankową;
- metrologia agrofizyczna - pomiar i monitoring procesów z uwzględnieniem ich zmienności czasowo-przestrzennej; wybór oraz określenie współczynników transportu dla konkretnych przypadków i skali;
- określenie i identyfikacja funkcji "pedotransfer";
- opis i identyfikacja rodzaju przepływu preferencyjnego wody w glebie.

Procesy wymiany masy, pędu i energii w glebie oraz w przyziemnej warstwie atmosfery mają decydujący wpływ na intensywność ewapotranspiracji, temperaturę i zawartość wody w profilu glebowym, a zatem na kształtowanie się warunków wzrostu i rozwoju roślin.

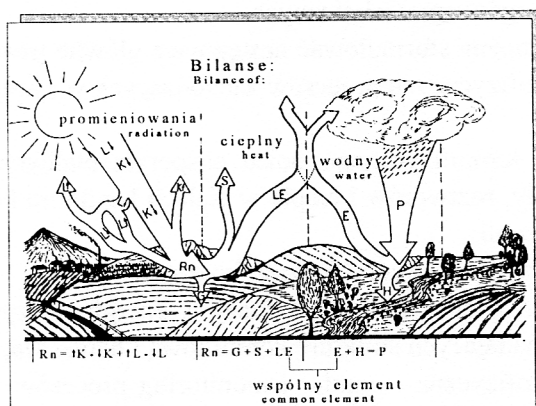
Wodę, która w postaci opadu dociera do powierzchni gleby, można podzielić na dwa główne strumienie. Strumień powracający do atmosfery poprzez ewapotranspirację, którego część związana jest z procesem produkcji roślinnej, oraz strumień wody przepływający do gleby, powodujący akumulację wody oraz zasilanie zasobów podziemnych i zbiorników powierzchniowych. Czynnikiem fizycznym decydującym o udziale obu strumieni jest bilans wodny i energetyczny danego obszaru (Rys. 1) [23]. Istnieje ścisła zależność pomiędzy bilansem energii i bilansem masy, ponieważ strumień ciepła utajonego LE w równaniu bilansu cieplnego:

$$R_n = G + S + LE \quad (1)$$

jest iloczynem strumienia pary wodnej E występującym w równaniu bilansu wody:

$$P = E + H + \Delta R \quad (2)$$

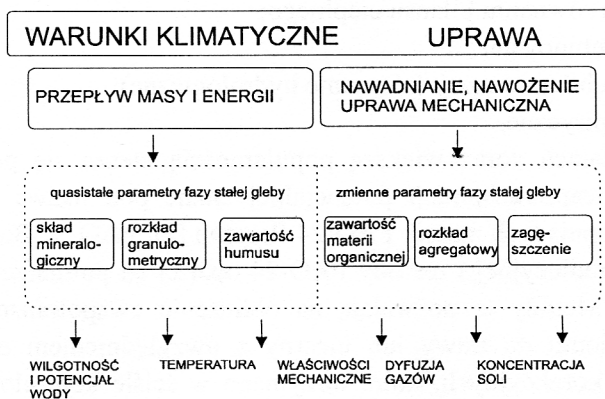
i utajonego ciepła parowania wody L . W powyższych równaniach R_n oznacza saldo promieniowania, G – strumień ciepła wpływającego do gleby, S – strumień ciepła jawnego, P – opad atmosferyczny, H – odpływ, a ΔR – zmianę retencji glebowej w rozpatrywanym okresie czasu.



Rys. 1. Schemat powiązania bilansu promieniowania z bilansem cieplnym i bilansem wodnym w krajobrazie rolniczym [23].

Fig. 1. Scheme of relationship between radiation, heat and water balances in agricultural landscape [23].

Właściwości gleby decydują o wzroście i rozwoju roślin oraz mają decydujące znaczenie w kształtowaniu stanu środowiska. Na przebieg procesów fizycznych w glebie wpływają właściwości jej fazy stałej. Część tych właściwości jest niezmienna w czasie i charakterystyczna dla danej gleby, natomiast część zmienna. Oznacza to, że można je kształtować poprzez dobór odpowiednich zabiegów uprawowych (Rys. 2).



Rys. 2. Czynniki kształtujące warunki wzrostu i rozwoju roślin [29].

Fig. 2. Factors forming of the conditions of plant growth and development [29].

Właściwości fazy stałej gleby: skład mineralogiczny, rozkład granulometryczny, zawartość próchnicy, zawartość materii organicznej, rozkład agregatowy i zagęszczenie wpływają na zdolność do akumulacji masy i energii oraz współczynniki przenoszenia, decydując o zawartości wody, jej dostępności dla systemu korzeniowego roślin, koncentracji soli, temperaturze, właściwościach wodno-powietrznych oraz właściwościach mechanicznych [7].

Procesy wymiany masy i energii w przyziemnej warstwie atmosfery mają decydujący wpływ na intensywność ewapotranspiracji, którą można mierzyć metodami bezpośrednimi i pośrednimi a wszelkie procesy zachodzące w warstwie granicznej atmosfery można opisywać równaniami stanu oraz wyrażać zasadami zachowania masy, pędu i energii [1].

W metodach bezpośrednich ewapotranspiracja mierzona jest ubytkami wody w badanym okresie czasu z ewaporometrów wodnych, glebowych lub lizymetrów. Natomiast metody pośrednie pozwalają na określanie strumienia pary wodnej poprzez pomiary pośrednie, równania fizyczne i statystyczne oraz modele symulujące proces parowania.

Ze względu na metody pomiaru, uwzględniane procesy i metody matematyczne stosowane do wyznaczania ewapotranspiracji, wyróżniamy następujące grupy metod [1]:

- bazujące na pomiarach turbulencyjnego transportu energii, masy i pędu w przygruntowej warstwie atmosfery;
- bazujące na pomiarach średnich profili elementów meteorologicznych;
- bazujące na równaniu bilansu cieplnego;
- metody kombinowane;
- bazujące na bilansie masy (równanie hydrologiczne);
- metody empiryczne.

W ostatnich latach coraz większą popularnością cieszą się półempiryczne wzory liczenia ewapotranspiracji potencjalnej znane pod nazwą FAO-24 [1]. Dotyczą one następujących metod: FAO-24 Penman [2], FAO-24 Blaney-Criddle, FAO-24 metody radiacyjnej i metody FAO-24 opartej na pomiarze ewaporometrami wodnymi. Metody te pozwalają na obliczenie ewapotranspiracji potencjalnej w odniesieniu do trawy lub lucerny z uwzględnieniem empirycznych współczynników korekcyjnych, które otrzymano w ściśle kontrolowanych doświadczeniach poletkowych, prowadzonych w różnych warunkach meteorologicznych, przy zastosowaniu metody regresji wielokrotnej z parametrami klimatycznymi jako zmiennymi niezależnymi.

W metodzie FAO-24 Penman (dla traw) równanie opisujące dobowe wartości ewapotranspiracji odniesienia ma postać:

$$E = c[WR_n + (1 - W)0,27(1 + 0,01u_2)(e_a - e_d)] \quad (3)$$

gdzie:

E - ewapotranspiracja w odniesieniu do trawy [$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$];

c - empiryczny współczynnik korekcyjny, wyrażony jako funkcja dziennej radiacji słonecznej, maksymalnej dziennej wilgotności względnej powietrza, sumy dziennej prędkości wiatru (między 7⁰⁰ i 19⁰⁰) oraz stosunku dziennej do nocnej prędkości wiatru;

W - psychrometryczna funkcja wagowa równa $\Delta(\Delta + \gamma)^{-1}$;

Δ - nachylenie krzywej prężności pary wodnej nasyconej względem temperatury [kPa K^{-1}];

γ - stała psychrometryczna [kPa K^{-1}];

R_n - saldo promieniowania [mm d^{-1}];

u_2 - średnia dzienna prędkość wiatru na wysokości 2 m [km d^{-1}];

e_a - prężność pary wodnej nasyconej przy średniej dziennej temperaturze powietrza [mb];

e_d - prężność pary wodnej nasyconej przy średniej dziennej temperaturze punktu rosy [mb].

W metodzie FAO-24 Blaney-Criddle wykorzystywane jest równanie:

$$E = a + b[p(0,46T + 8,13)] \quad (4)$$

gdzie:

a i b - czynniki kalibracyjne będące funkcjami minimalnej dziennej wilgotności względnej powietrza, średniego stosunku aktualnych do możliwych godzin ze słońcem oraz sumy dziennej prędkości wiatru (między 7⁰⁰ i 19⁰⁰);

p - średni dzienny procent całkowitej rocznej ilości godzin dziennych stanowiący funkcję szerokości geograficznej i daty;

T - temperatura [K].

Metoda radiacyjna FAO-24 wykorzystuje równanie [6]:

$$E = c(W \cdot R_s) \quad (5)$$

gdzie:

c - czynnik kalibracyjny będący funkcją średniej dziennej wilgotności względnej powietrza i dziennej prędkości wiatru;

R_s - średnie dzienne promieniowanie krótkofalowe.

Metoda FAO-24 oparta o pomiar ewaporometrami wodnymi korzysta z równania:

$$E = k_p E_p \quad (6)$$

gdzie:

k_p - współczynnik proporcjonalności będący funkcją średniej dziennej wilgotności względnej powietrza, średniej dziennej prędkości wiatru oraz właściwości otoczenia ewaporometru;

E_p - wielkość parowania z ewaporometru.

MODELOWANIE PROCESÓW WYMIANY 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.

Korzystając z zasad zachowania i praw termodynamiki, przepływ masy i energii w badanym układzie termodynamicznym można przedstawić przy pomocy uogólnionego równania:

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k \quad (7)$$

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

$$L_{ik} = L_{ki}. \quad (8)$$

Powyższa zasada nosi nazwę zasady Onsagera.

Korzystając z zasady Onsagera można strumienie wody, ciepła i soli wyrazić przy pomocy następującego układu równań:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\nabla \cdot ((D_{\Theta l} + D_{\Theta v}) \nabla \Theta) - \nabla \cdot ((D_{Tl} + D_{Tv}) \nabla T) - \nabla K \quad (9)$$

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \nabla \cdot (D_{\Theta v} \nabla \Theta) \quad (10)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) - \nabla \cdot (v \cdot C) \quad (11)$$

gdzie: c_v - pojemność cieplna;

T - temperatura;

t - czas;

λ - przewodnictwo temperaturowe;

L - ciepło przejścia fazowego ciec-zgaz;

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 cieczy w warunkach nieizotermicznych;

C - koncentracja soli;

D - współczynnik dyfuzji i dyspersji hydrodynamicznej.

Udział poszczególnych strumieni w transporcie wody w ciałach kapilarno-porowatych ma znaczący wpływ na kształtowanie temperatury i koncentracji soli, ponieważ strumieniowi pary towarzyszy przepływ energii przejścia fazowego gaz-ciecz (ciepło parowania), a sole są transportowane wraz ze strumieniem cieczy [28]. Strumień wody w postaci pary ma istotne znaczenie przy niższych wilgotnościach. W warunkach nieizotermicznych woda przemieszcza się również pod wpływem gradientu temperatury. Pod wpływem tych gradientów woda może przemieszczać się w postaci pary lub cieczy.

Konstrytuwne równania fizyczne wyrażające zasady zachowania pędu, masy i energii używane są do opisu procesów fizycznych zachodzących w systemie gleba-roślina-atmosfera. Równania, wynikające z zasad zachowania, opisujące wybrane zjawiska w tym systemie, np. transport wody, soli i ciepła w glebie, odkształcenie i naprężenie gleby w wyniku oddziaływania kół i części roboczych maszyn i narzędzi rolniczych, wymagają, do ich rozwiązania, znajomości współczynników charakteryzujących badany obiekt. Również do poprawnej weryfikacji rozwiązania zastosowanego równania niezbędna jest znajomość dynamiki badanej wielkości fizycznej, np. wilgotności, zasolenia i temperatury gleby, parametrów agroklimatycznych takich jak: wielkość opadu, radiacja, wilgotność i temperatura powietrza. Dlatego też niezbędne jest monitorowanie właściwości systemu gleba-roślina-atmosfera [27].

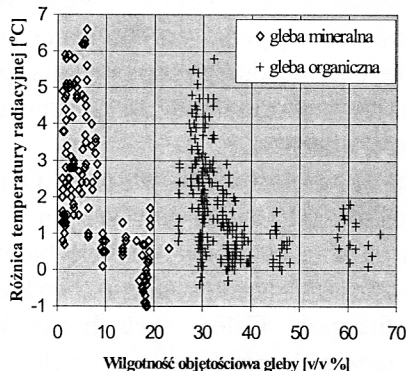
METROLOGIA AGROFIZYCZNA

Metrologia agrofizyczna zajmuje się zagadnieniami pomiaru właściwości obiektów rolniczych i parametrów procesów fizycznych i fizykochemicznych systemu gleba-roślina-atmosfera. Zapewnienie odpowiedniego zaopatrzenia roślin w wodę przy jednoczesnym oszczędnym jej wykorzystaniu to podstawowy współcześnie problem dysponowania zasobami wodnymi.

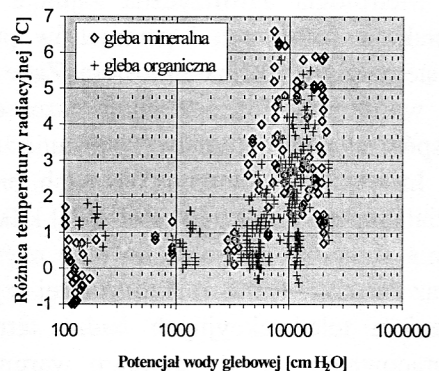
Instytut Agrofizyki (w ramach projektu sponsorowanego przez FAO oraz działalności statutowej) realizował kilkunastoletni cykl badań dotyczących określenia stresu wodnego roślin jako czynnika ograniczającego produkcję biomasy oraz ewapotranspiracji rzeczywistej czyli składowej bilansu wodnego z wykorzystaniem teledetekcyjnych badań termograficznych. Celem tych badań było opracowanie metody pomiaru warunków wodnych użytków zielonych i pól uprawnych w aspekcie sterowania systemami melioracji wodnych obszarów użytkowanych rolniczo. W badaniach zastosowano zdalny pomiar temperatury radiacyjnej roślin. Temperatura radiacyjna pokrywy roślinnej jest uwarunkowana czynnikami agrometeorologicznymi oraz intensywnością ewapotranspiracji

rzeczywiście. Ewapotranspiracja jako proces energochłonny powoduje obniżanie temperatury roślin. Badania ukierunkowano na możliwość wykorzystania metody termografii do określenia wpływu dostępności wody glebowej dla systemu korzeniowego na intensywność ewapotranspiracji, a zatem na kształtowanie się temperatury liści. Szczególnie ważnym jest określenie momentu powstawania stresowych warunków wodnych. Stres wodny, w tym jego głębokość i czas trwania, mogą spowodować okresowe zahamowanie funkcji fizjologicznych, spadek plonów, a w warunkach ekstremalnych śmierć rośliny. Badania prowadzono w warunkach wazonowych - szklarniowych i lizymetrycznych - polowych przy zastosowaniu kamer AGA 680 SWB oraz AGEMA 880 LWB, pracujących odpowiednio w zakresach $3-5 \mu\text{m}$ i $8-13 \mu\text{m}$. Stwierdzono, że pomiar różnicy temperatury radiacyjnej (badany obiekt - obiekt w warunkach komfortu wodnego) nie może być stosowany do określania ilości wody zmagazynowanej w glebie, a jedynie do wyznaczenia wartości wilgotności odpowiadającej ograniczeniu dostępności wody dla roślin. Wartości tych wilgotności są charakterystyczne dla poszczególnych gleb (gleba mineralna ok. 10%, gleba organiczna ok. 40% - Rys. 3a). Odpowiadają one potencjałowi wody glebowej ok. 15 000 $\text{cm H}_2\text{O}$. Wykazano, że głównym czynnikiem warunkującym temperaturę radiacyjną pokrywy roślinnej związaną z warunkami wilgotnościowymi w glebie jest potencjał wody glebowej, którego wartości decydują o ograniczonej lub całkowicie zahamowanej dostępności wody dla roślin (Rys. 3b).

a)



b)



Rys. 3. Zależność różnicy temperatury radiacyjnej od: a) wilgotności, b) potencjału wody glebowej [18].

Fig. 3. Radiational temperature difference as influenced by: a) the moisture content, and b) the water potential [18].

W Instytucie Agrofizyki PAN opracowano metodę i aparaturę do pomiaru wilgotności gleby wykorzystującą metodę reflektometrii w domenie czasu TDR (Time Domain Reflectometry) [17]. Metoda ta polega na pomiarze prędkości rozchodzenia się impulsu elektromagnetycznego w badanym ośrodku, która zależy od stałej dielektrycznej tego ośrodka. Zawartość wody istotnie modyfikuje stałą dielektryczną gleby, a zatem wpływa na prędkość propagacji w niej fali elektromagnetycznej. W oparciu o technologię TDR, oprócz prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego w glebie, która odzwierciedla jej wilgotność, można również mierzyć, tym samym czujnikiem, elektryczną przewodność gleby, która odzwierciedla jej zasolenie [16,18].

WYKORZYSTANIE FIZYCZNYCH METOD BADAŃ DO OGRANICZANIA STRAT ILOŚCIOWYCH I JAKOŚCIOWYCH PŁODÓW ROLNYCH

W ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęca się zagadnieniom jakości żywności - poczynając od etapu produkcji rolniczej, poprzez okres przechowywania płodów rolnych, przetwarzania aż do momentu uzyskania produktu finalnego. Jakość pozyskiwanych płodów rolnych ma decydujący wpływ na jakość produktu końcowego - wytworzonej żywności. Zastosowanie fizycznych metod badań do rozwiązywania zagadnień związanych z produkcją rolniczą otworzyło nowe możliwości ograniczania strat wynikających z niewłaściwej oceny wpływu stosowanych technologii zbioru, przetwarzania i obróbki płodów rolnych.

Przykładem kompleksowego podejścia do jednego, wybranego zagadnienia są prowadzone w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie badania dotyczące technologii zbioru rzepaku. Poszukiwania te, poczynając od badań podstawowych, poprzez technologiczno-polowe do prac wdrożeniowych, pozwoliły na opracowanie nowej technologii umożliwiającej ograniczenie strat ilościowych i jakościowych nasion w trakcie zbioru kombajnowego i obróbki pozbiorowej. Podstawą były badania agrofizyczne zarówno samych roślin, jak i warunków ich zbioru. Opracowana nowa technologia została wdrożona i rozpowszechniona w całym kraju, zyskując bardzo wysokie oceny producentów [25].

Badania pojedynczych nasion roślin uprawnych wykazały, że uszkodzenia wewnętrzne powstają pod wpływem obciążeń mechanicznych, zmiany temperatury oraz wilgotności. W badaniach tych szczególnie przydatna okazała się technika rentgenowskiej detekcji uszkodzeń wewnętrznych. Istotna korelacja parametrów mechanicznych: modułu sprężystości, wytrzymałości oraz twardości

z ilością mikro- i makrouszkodzeń wywołanych obciążeniami statycznymi i dynamicznymi znacznie poszerza możliwości oceny stanu struktury wewnętrznej ziarna [11, 22, 30, 31].

METODY OKREŚLANIA JAKOŚCI PŁODÓW ROLNYCH

Na przestrzeni ostatnich trzydziestu lat powstało wiele nowych metod szybkiego i dokładnego określania jakości płodów rolnych. Metody te bazują na pomiarze wielu różnych właściwości fizycznych, które korelują dobrze ze wskaźnikami jakości badanych materiałów [3-5]. Pomiar takie pozwalają na wyznaczanie właściwości fizycznych, które w sumie składają się na tzw. teksturę materiału – często używane pojęcie związane z subiektywnym odczuciem w ustach konsumenta podczas spożywania produktu.

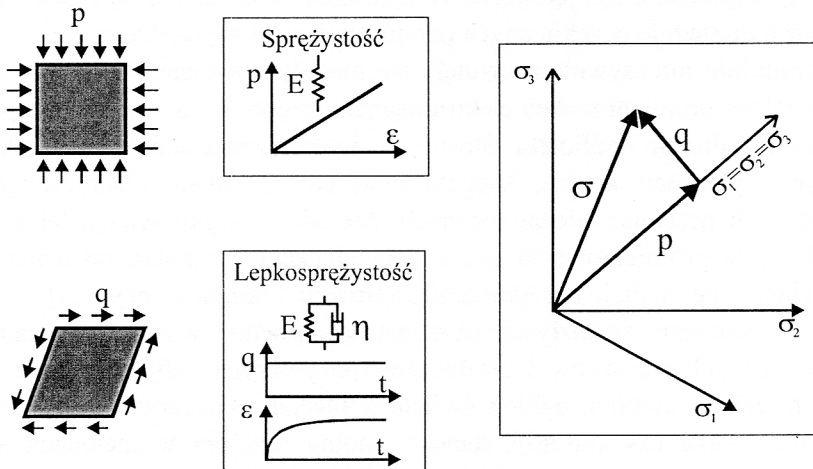
Duża grupa metod szybkiej oceny jędrności owoców i warzyw oparta jest na pomiarze takich cech mechanicznych, jak: sprężystość, sztywność, częstotliwość rezonansowa czy parametry tłumienia drgań mechanicznych. Badania właściwości mechanicznych owoców i warzyw korzeniowych są pomocne w poszukiwaniu optymalnych warunków przechowywania, co jest podstawą utrzymania wysokiej ich jakości przez długi czas. Jako wskaźnik jakości płodów rolnych bardzo często wykorzystywane są właściwości reologiczne dające możliwość precyzyjnego określania stanu odkształcenia i naprężenia. Takie właściwości mechaniczne, 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.

Niektóre z metod badania jędrności całych owoców i warzyw wykorzystują teorię sprężystego kontaktu ciał. Najczęściej stosowanym testem w tej grupie badań jest ściskanie całego owocu między równoległymi płaszczyznami. Problematiczna jest jednak interpretacja wyników takich badań.

Inne metody, bazujące również na teorii sprężystości, wykorzystują analizę drgań całych owoców. Wyznaczane częstotliwości rezonansowe pobudzanych do drgań owoców stanowią miarę ich wypadkowej jędrności. Zastosowanie laserowego wibrometru Dopplera umożliwia zdalną analizę częstotliwości rezonansowych oraz parametrów tłumienia drgań, co stanowi podstawę wyznaczania w nieniszczący sposób modułu ścinania silnie skorelowanego z jędrnością [24].

Liczne badania wskazują, że w przypadku owoców i warzyw o dużej zawartości wody i małej zawartości przestrzeni powietrznych odkształcenie objętościowe, wywołane naprężeniem izotropowym (wektor p na Rys. 4), można

potraktować jako sprężyste, zaś odkształcenie postaciowe, powstające pod wpływem naprężenia ścinającego (wektor q na Rys. 4), jako lepkosprężyste. W złożonym stanie naprężenia (wektor σ na Rys. 4) wypadkową reakcję materiału można wtedy z dobrym przybliżeniem opisać jako złożenie reakcji sprężystej i lepkosprężystej. Przyjęcie nawet tak prostego modelu pozwala z dobrą dokładnością modelować reakcję owoców i warzyw na różnego rodzaju obciążenia, statyczne i dynamiczne. Model taki pozwala również przewidzieć graniczną prędkość deformacji, powyżej której następuje uszkodzenie tkanki. Umożliwia weryfikację prostych testów do szybkiego określania tzw. „kondycji fizycznej” produktów rolniczych [10].



Rys. 4. Przykład modelowania właściwości reologicznych produktów rolniczych.

Fig. 4. Example of modelling of the rheological properties of food materials.

Owoce i warzywa bardzo często są narażone na powstawanie mechanicznych uszkodzeń w trakcie zbioru i przetwarzania. Szczególnie trudne do weryfikacji są małe wewnętrzne pęknięcia, tworzące jednak drogi zakażeń i zmian biochemicznych prowadzących do psucia się surowca w trakcie przechowywania. Bardzo dobrym narzędziem wykrywania tego typu uszkodzeń okazała się metoda emisji akustycznej, która pozwala rejestrować sygnały akustyczne generowane przez odkształcaną tkankę roślinną. Energia wyzwolana podczas pęknięcia tkanki, emitowana jako fala sprężysta, niesie informację o powstawaniu wewnętrznych uszkodzeń. Badania prowadzone w tym zakresie w Instytucie Agrofizyki wska-

zują na bardzo dużą przydatność metody emisji akustycznej do wykrywania i badania procesów pękania tkanek roślinnych w różnych warunkach zewnętrznych [32]. Emisja fal akustycznych, powstających podczas niszczenia struktury wewnętrznej materiału, wykorzystywana jest również jako wskaźnik tekstury takich produktów spożywczych, jak np. kruche ciastka, chipsy itp. [19].

Bardzo duże zastosowanie w praktyce znajdują nieniszczące metody oceny jakości płodów rolnych oraz detekcji uszkodzeń wewnętrznych. Zaliczyć do nich można metody optyczne, akustyczne, ultradźwiękowe, elektryczne, metody oparte na diagnostyce rentgenowskiej, magnetycznym rezonansie jądrowym. Metody te wspomagane komputerowymi systemami przetwarzania danych umożliwiają szybką ocenę jakości płodów rolnych oraz automatyczną ich selekcję według przyjętego kryterium, np. jędrności. Dzięki temu dostarczanie na rynek owoców i warzyw o dokładnie oczekiwanych parametrach staje się bardzo łatwe.

Szczególnie intensywnie rozwinęły się metody optyczne. Metody te stosują szeroki zakres promieniowania elektromagnetycznego: od podczerwieni, poprzez światło widzialne do nadfioletu. Stosuje się je do wyznaczania wielu cech materiałowych żywności: koloru, kształtu i wielkości, składu chemicznego oraz zachodzących przemian biochemicznych. Metody te wykorzystują takie efekty oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z badanymi materiałami, jak: pochłanianie, odbicie i rozpraszanie, dyfrakcja i luminescencja [15].

Metody optyczne znalazły szerokie zastosowanie do wyznaczania parametrów technologicznych surowców i produktów spożywczych. Wykorzystanie nowoczesnych technik pomiaru odbicia światła w bliskiej podczerwieni do określania zawartości białka czy tłuszczu stanowi istotny przełom w metodach analizy jakości technologicznej ziarna od czasu popularnej metody Kiejdahla.

SKŁADOWANIE PŁODÓW ROLNYCH W STANIE SYPKIM

Bardzo duża grupa płodów rolnych jest składowana, obrabiana i przetwarzana w stanie sypkim. Przykładem może być ziarno zbóż i nasiona roślin oleistych. Znajomość właściwości fizycznych materiałów sypkich jest nieodzowna do projektowania urządzeń do ich składowania i przetwarzania. Urządzenia muszą spełniać dwa podstawowe wymagania: zapewniać utrzymanie wysokiej jakości przetwarzanych surowców oraz prawidłowy i bezpieczny przebieg przeprowadzanych operacji.

Wpływ warunków składowania na jakość

Z oficjalnych raportów wynika, że 20% światowych zbiorów zbóż ulega zniszczeniu wskutek niewłaściwych warunków przechowywania. Głównymi przyczynami strat są: metabolizm ziarna, aktywność szkodników zbożowych oraz transport. Bardzo duże straty może powodować również obniżenie jakości ziarna na skutek niewłaściwych warunków przechowywania. Systemy magazynowania ziarna określane bywają jako stworzone przez człowieka ekosystemy. Utrata jakości wynika z interakcji pomiędzy zmiennymi fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi. Najistotniejsze z nich to: temperatura, wilgotność, skład atmosfery, obecność mikroorganizmów, insektów, roztoczy ale również położenia geograficznego i struktura spichlerza. Magazynowanie produktów rolniczych to równocześnie element produkcji, konserwacji, transportu, marketingu i systemu użytkowania tych produktów.

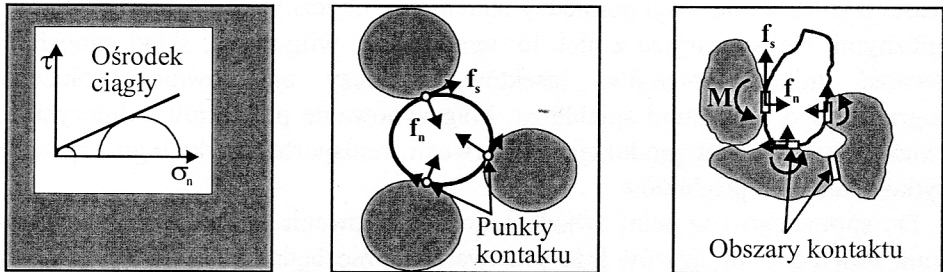
Do sprawnego i w pełni świadomego kontrolowania warunków przechowywania zboża oraz produktów jego przetwarzania niezbędny jest wspólny wysiłek inżynierów, fizyków, chemików, biologów, ekologów i innych specjalistów. Interdyscyplinarne podejście do rozwiązania problemu przechowywania zboża rozwijane od blisko 30 lat na Uniwersytecie Manitoba w Kanadzie zaowocowała opracowaniami licznych modeli matematycznych obejmujących interakcje pomiędzy składnikami systemu [21].

Prowadzone w Instytucie Agrofizyki badania dotyczące magazynowania nasion rzepaku wykazały, że warunki magazynowania w silosach (temperatura, obciążenie) oraz parametry wyjściowe nasion (wilgotność, dojrzałość, ilość zanieczyszczeń, odmiana) istotnie modyfikują jakość materiału w trakcie przechowywania. Wyższa wilgotność przechowywanych nasion sprzyja ich deformacji, co w konsekwencji prowadzi do zbrylania przechowywanego materiału. Szczegółowa analiza parametrów technologicznych nasion podczas długotrwałego cyklu przechowywania pozwoliła na wyznaczenie granicznych warunków magazynowania pozwalających na bezpieczne składowanie nasion [26]. Wyniki mogą służyć do przewidywania zachowania się nasion w czasie przechowywania i prognozowania dalszej ich jakości.

Właściwości fizyczne materiałów sypkich istotne w procesach składowania

Prawidłowy i bezpieczny przebiegu operacji technologicznych związanych ze składowaniem, przemieszczaniem i przetwarzaniem materiałów sypkich uzależniony jest w dużym stopniu od znajomości właściwości fizycznych tych materiałów oraz poprawnego rozumienia oddziaływań zachodzących w relacji z materiałami konstrukcyjnymi.

Uwzględnienie w opisie właściwości fizycznych materiałów sypkich ich struktury wewnętrznej pozwoliło uzyskać istotny postęp w zrozumieniu zachowania się tych materiałów w różnych warunkach zewnętrznych. Modele mikrostrukturalne wyprowadzają ogólne prawa rządzące zachowaniem się materiału sypkiego z oddziaływań zachodzących pomiędzy poszczególnymi granulami: odkształceń i przemieszczeń poszczególnych ziaren ośrodka oraz rozkładu sił w punktach kontaktu ziaren (Rys. 5).

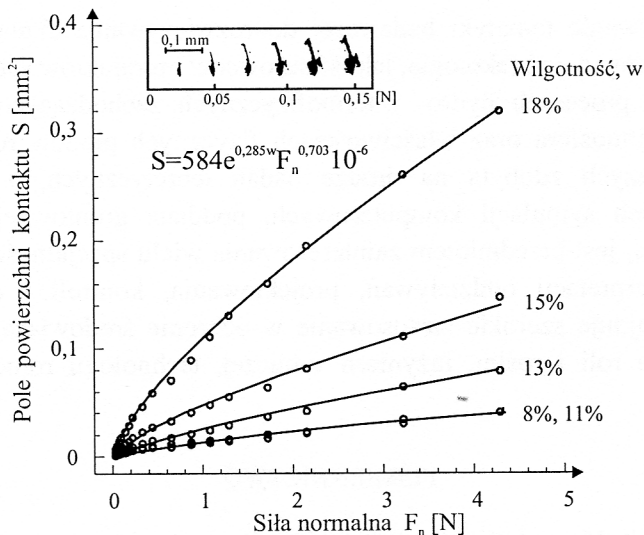


Rys. 5. Materiał sypki w ujęciu mechaniki ośrodków ciągłych oraz mikrostrukturalnym.

Fig. 5. Granular material in continuum mechanical and microstructural approach.

Znamiennym jest stopniowe rozszerzanie zakresu uwzględnianych oddziaływań: począwszy od analizy przemieszczeń poszczególnych ziaren, poprzez uwzględnianie obrotów ziaren, aż do zastąpienia punktów kontaktu ziaren obszarami kontaktu, na których powstają opory tarcia posuwistego oraz tocznego [14]. Zakres praktycznych zastosowań tworzonych modeli zależy między innymi od wyposażenia ich w dokładne wartości parametrów opisujących strukturę materiału oraz oddziaływania w obszarze kontaktu ziaren (Rys. 6).

Cechą charakterystyczną materiałów pochodzenia roślinnego jest duża odkształcalność ziaren ośrodka oraz silna zależność właściwości fizycznych od wilgotności. Woda wnikając do wnętrza ziaren prowadzi do jakościowej zmiany właściwości fizycznych. Takie podstawowe parametry mechaniczne, jak: kąt tarcia wewnętrznego, współczynnik tarcia o materiały konstrukcyjne, iloraz naporu czy gęstość zależą istotnie od wilgotności [13]. Wyjaśnienia wzajemnych zależności pomiędzy wymienionymi parametrami poszukiwać należy na poziomie elementarnych oddziaływań pomiędzy ziarnami ośrodka. Znajomość zależności pola powierzchni elementarnego kontaktu ziaren ośrodka oraz stanu tej powierzchni: wysokość nierówności, twardość, obecność substancji pośredniczących od wilgotności i nacisku normalnego pozwala wyjaśnić wiele prawidłowości obserwowanych w praktycznych warunkach [20].



Rys. 6. Pole powierzchni kontaktu ziarna pszenicy z płaską powierzchnią w funkcji wilgotności i siły normalnej [20].

Fig. 6. Surface area of a single contact of wheat grain with flat surface as a function of the moisture content and the normal force [20].

PODSUMOWANIE

Analizując rozwój badań prowadzonych w agrofizyce w zakresie zastosowania fizycznych metod do badania środowiska naturalnego oraz produktów rolniczych bardzo wyraziste stają się trzy wyznaczniki tej aktywności:

- poszukiwanie wyjaśnienia badanych zagadnień na gruncie uniwersalnych praw fizyki, chemii i biologii (modelowania procesów hydro-termofizycznych w układzie gleba-roślina-atmosfera wykorzystujące prawa termodynamiki oraz zasady zachowania masy i energii, zastosowanie fizyki statystycznej, mikromechaniki, opisu fraktalnego do zagadnień istotnych dla rolnictwa);
- wykorzystywanie najnowszych zdobyczy nauk ścisłych do rozwiązywania zagadnień rolniczych (zastosowanie teledetekcji do zdalnego pomiaru temperatury radiacyjnej pokrywy roślinnej, metody TDR do pomiaru wilgotności, rozwój metod szybkiego i dokładnego określania jakości płodów rolnych opartych na pomiarze właściwości fizycznych);

- dostosowywanie tematyki badawczej do rozwiązywania aktualnie najistotniejszych zagadnień (ekologia, jakość surowców i produktów spożywczych).

Wiedza o procesach hydro- i termofizycznych zachodzących w układzie gleba-roślina-atmosfera oraz właściwościach fizycznych płodów rolnych i produktów 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. **Baranowski P., Mazurek W.:** Modelowanie procesu ewapotranspiracji - przegląd metod. VIII Szkoła „Fizyka z Elementami Agrofizyki”, Lublin, 19-20, 1996.
2. **Businger J.A.:** Some remarks on Penman's equation for the evapotranspiration. *Neth. J. Agri. Sci.*, 4, 77-80, 1956.
3. **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.
4. **De Baedemaeker J.:** Firmness and softening of fruits and vegetables. International Conference „Physical Methods in Agriculture”, Prague, Book of abstracts, 15-16, 2001.
5. **Dobrzański B. jr, Rybczyński R.:** Właściwości mechaniczne i optyczne gruszek jako parametry oceny ich dojrzałości. *Acta Agrophysica*, 45, 61-68, 2001.
6. **Doorenbos J., Pruitt W.O.:** Guidelines for predicting crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 156 p., 1977.
7. **Gliński J., Lipiec J.:** Soil physical conditions and plants roots. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, 1990.
8. **Gliński J., Konstankiewicz K.:** Agrofizyka dla środowiska i bezpiecznej produkcji biologicznej. *Acta Agrophysica*, 20, 1999.
9. **Gliński J., Walczak R.T.:** Role of agrophysics in the concept of sustainable agriculture. *Int. Agrophysics*, 12, 25-32, 1998.
10. **Gołacki K.:** Charakterystyki lepkosprężyste korzeni marchwi w szerokim zakresie prędkości obciążeń mechanicznych. Rozprawa habilitacyjna, Rozprawy Naukowe Akademii Rolniczej w Lublinie, 216, 1998.
11. **Grundas S., Velikanov L., Archipov M.:** Importance of wheat grain orientation for the detection of internal mechanical damage by the X-ray method. *Int. Agrophysics*, 13, 355-361, 1999.

12. **Haman J.:** Znaczenie badań agrofizycznych i ich upowszechniania. Szkoła „Fizyka z elementami agrofizyki”, Lublin, 15-21, 1997.
13. **Horabik J.:** Charakterystyka właściwości fizycznych roślinnych materiałów sypkich istotnych w procesach składowania. *Acta Agrophysica*, 54, 2001.
14. **Iwashita K., Oda M.:** Micro-deformation mechanism of shear banding process based modified distinct element method. *Powder Technology*, 109, 192-205, 2000.
15. **Kuczyński A., De Baedemaeker J., Oszmiański J.:** An optical reflectance method for studying the enzymatic browning reaction in apple. *Int. Agrophysics*, 8, 421-425, 1994.
16. **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.
17. **Malicki M.A., Walczak R.T.:** Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. *European Soil Sci.*, 50, 505-514, 1999.
18. **Mazurek W.:** Temperatura radiacyjna jako wskaźnik stresu wodnego roślin. Praca doktorska, Instytut Agrofizyki PAN, Lublin, 1997.
19. **Melcion J.P.:** Physical characterisation of plant material using optical methods and their practical applications. Examples in cereal grains and seeds industries. II Zjazd Naukowy PTA, Lublin-Dąbrowica, Referaty i doniesienia, 31-38, 2000.
20. **Molenda M., Horabik J., Grochowicz M., Szot B.:** Tarcie ziarna pszenicy. *Acta Agrophysica*, 4, 1995.
21. **Muir W.E., Jayas D.S., Britton M.G., Sinha R.N., White N.D.G.:** Interdisciplinary grain storage research. *Powder Handling and Processing*, 1(3), 281-295, 1989.
22. **Niewczas J., Grundas S., Ślipek Z.:** The analysis of increments of internal damage to wheat grain affected by dynamic loading. *Int. Agrophysics*, 8, 283-287, 1994.
23. **Olejnik J.** Modelowe badania struktury bilansu cieplnego i wodnego zlewni w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych. Rozprawa habilitacyjna, Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, 268, 1996.
24. **Sakurai N., Terasaki S., Wada N., Murayama H., Yamamoto R., Nevins D.J.:** Nondestructive and remote sensing of fruit firmness by a laser Doppler vibrometer. International Conference „Physical Methods in Agriculture”, Prague, Book of abstracts, 192-193, 2001.
25. **Szot B., Stępniewski A.:** Significance of the investigation of physical properties of plant raw material for food industry. *Int. Agrophysics*, 13, 411-415, 1999.
26. **Tys J., Szwed G.:** Rapeseed storage and their mechanical strength. *Int. Agrophysics*, 14, 255-257, 2000.
27. **Walczak R.:** Nowe aspekty metrologii agrofizycznej. *Nauka Polska*. Nr 4, 1993.
28. **Walczak R., Reszetin O., Czachor H.:** Transport water and heat in soil. *Polish J. Soil Sci.* VII, 1, 19-25, 1974.
29. **Walczak R., Zawadzki S.** Soil water as basic factor of the growth and crop yield of plant. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 229, 53-59, 1979.

30. **Woźniak W., Niewczas J., Kudra T.:** Internal damage vs. mechanical properties of microwave-dried wheat grain. *Int. Agrophysics*, 13, 259-268, 1999.
31. **Woźniak W., Styk W.:** Internal damage to wheat grain as results of wetting and drying. *Drying Technology*, 14(2), 349-365, 1996.
32. **Zdunek A., Konstantkiewicz K.:** Emisja akustyczna w badaniu procesów pęknięcia tkanek roślinnych. *Acta Agrophysica*, 55, 2001.

ROLE OF PHYSICAL METHODS OF INVESTIGATIONS OF NATURAL ENVIRONMENT AND FOOD PRODUCTS

J. Horabik, R.T. Walczak

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

Summary. The paper presents the physical methods of investigations of natural environment and food products applied in agrophysics. Experimental methods of investigations of hydro- and thermophysical processes in the soil-plant-atmosphere system were described. Modelling of the processes of mass and energy transfer in the soil-plant-atmosphere system with use of the principle of mass and energy conservation and thermodynamical principles were discussed. Special attention was paid to direct and indirect methods of measurements of evapotranspiration. Problems of agrophysical metrology were discussed basing on an example of application of teledetection for remote measurement of radiational temperature of plants for elaboration of measuring methods of water conditions for systems of hydrotechnical management and redistribution of water in the rural areas. Application of physical methods of investigations for decreasing qualitative and quantitative losses of plant materials resulting from incorrect evaluation of impact of applied technologies (harvest and processing) was indicated. Modern methods of 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. Modelling of the rheological properties which allow for quick evaluation of maturity of fruits and vegetables, influence of storage conditions and the resistance to mechanical loads were considered. Problems of storage of cereal grains and oilseeds were discussed. The most important technological parameters (time, temperature, pressure) and seed parameters (moisture, fine particle content, maturity stage) influencing quality of rape seeds during storage were indicated. Physical properties of granular materials of biological origin influencing storage, handling and processing were discussed.

Keywords: agrophysics, physical methods, natural environment, agricultural products, food products.