

TERMODYNAMIKA PROCESÓW GLEBOWYCH

R.T. Walczak, C. Sławiński

Instytut Agrofizyki PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

Streszczenie: W pracy przedstawiono możliwości zastosowania praw termodynamiki do opisu procesów akumulacji oraz przenoszenia masy i energii w systemie gleba-roślina-atmosfera, ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk zachodzących w glebie oraz do analizy właściwości reologicznych gleby.

Słowa kluczowe: agrofizyka, termodynamika, fizyka gleby.

Najbardziej podstawową nauką przyrodniczą, zajmującą się badaniem strukturalnych i dynamicznych praw przyrody jest fizyka. Jednym z najważniejszych zadań fizyki jest poznanie fundamentalnych i uniwersalnych własności materii wspólnych wszystkim lub przynajmniej wielu różnym jej formom. Z zadania tego wynika podstawowa, integrująca całe przyrodoznawstwo rola fizyki [1].

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.

Rozwój fizyki środowiska pozwolił na opisywanie, modelowanie i przewidywanie procesów zachodzących w środowisku życia i działalności człowieka.

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.

Agrofizyka, jako integralna część fizyki środowiska, dotyczy badań nad rolniczym wykorzystaniem terenu oraz produkcją 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.) [3].

Charakterystyczną, a zarazem specyficzną cechą parametrów systemu gleba-roślina-atmosfera jest ich zmienność czasowo-przestrzenna oraz występująca aktywność biologiczna. W badaniach agrofizycznych mamy do czynienia z obiektami trójfazowymi (ciało stałe, ciecz, gaz), ciałami kapilarno-koloidalno-porowatymi oraz o obudowie komórkowej i tkankowej.

Stany układów będących przedmiotem badań w agrofizyce opisywane są prawami termodynamiki. Przykładem może być opis stanu termodynamicznego wody w glebie. Wielkością opisującą stan energetyczny wody w glebie i jej dostępność dla systemu korzeniowego roślin jest potencjał wody glebowej, który w termodynamice statystycznej określany jest mianem potencjału chemicznego:

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{P, T, n_j \neq n_i} \quad (1)$$

gdzie G jest potencjałem termodynamicznym Gibbsa.

Całkowity potencjał wody glebowej jest różniczką zupełną i związany jest z siłami wzajemnego oddziaływania między fazami: stałą, ciekłą i gazową oraz występującymi siłami zewnętrznymi:

$$d\mu = \left(\frac{\partial \mu}{\partial P} \right)_{T, W, C} dP + \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_{P, W, C} dT + \left(\frac{\partial \mu}{\partial W} \right)_{P, T, C} dW + \left(\frac{\partial \mu}{\partial C} \right)_{P, T, W} dC + g \cdot dz \quad (2)$$

gdzie:

- P – ciśnienie zewnętrzne [Pa],
- T – temperatura [K],
- W – wilgotność gleby [cm^3/cm^3],
- C – koncentracja soli w glebie [cm^3/cm^3],
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
- z – współrzędna [m].

Do opisu fizycznych procesów zachodzących w badanych układach używane są konstytutywne równania fizyczne, wyrażające zasady zachowania pędu, masy i energii. Równania, wynikające z zasad zachowania, opisujące wybrane zjawiska

w tym systemie, np. transport wody, soli, gazów i ciepła w glebie [5], odkształcenie i naprężenie gleby w wyniku oddziaływania kół i części roboczych maszyn i narzędzi rolniczych, wymagają, do ich rozwiązania, znajomości współczynników kinetycznych 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 parametrów badanych systemów.

Podstawowym prawem fizycznym jest zasada zachowania masy, która mówi, że ilość substancji w objętości V ulega zmianie wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje wypadkowy niezerowy strumień tej substancji przez powierzchnię S , ograniczającą objętość V . Zasadę tą wyraża równanie ciągłości, które dla pola beźźródłowego ma postać:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right) + \nabla \cdot \vec{q} = 0 \quad (3)$$

a dla pola ze źródłami postać następującą:

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial t}\right) + \nabla \cdot \vec{q} = f(\vec{r}, t) \quad (4)$$

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

$$\vec{q} = K(\theta) \cdot \text{grad} \Psi \quad (5)$$

otrzymamy równanie Richardsa w postaci:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot K(\Theta) \text{grad} \Psi + f(\vec{r}, t) \quad (6)$$

gdzie:

q – gęstość strumienia wody [m/s],

$K(\Theta)$ – współczynnik przewodnictwa wodnego w strefie nienasyconej [m/s],

Θ – wilgotność [cm^3/cm^3],

Ψ – potencjał wody glebowej [J/m^3],

$f(r,t)$ – funkcja źródłowa.

Równanie Darcy stosuje się tylko w przypadku kiedy gęstość strumienia jest liniową funkcją gradientu potencjału, tzn. kiedy człon bezwładnościowy w równaniu Navier-Stokes'a można pominąć. Często jako wyznacznik stosowalności równania Darcy stosuje się krytyczny przedział wartości liczby Reynolds'a od 1 do 100 [2].

Rozwiązując równanie Richardsa z zadanymi warunkami początkowymi i brzegowymi możemy przewidzieć dynamikę wilgotności w profilu glebowym. Stabilność rozwiązania równania różniczkowego, a takim jest równanie Richardsa, polega na tym, aby błędy rozwiązania generowane w kolejnych krokach czasowych miały malejącą amplitudę.

Funkcja $f(r,t)$ jest funkcją przy pomocy której opisuje się ujemne i dodatnie źródła wody w systemie. Rolę ujemnego źródła wody w profilu glebowym spełnia system korzeniowy roślin, którego intensywność zależy od fazy rozwoju fenologicznego roślin oraz od aktualnych warunków agroklimatycznych, a więc ulega zmianie w czasie i przestrzeni. Dodatnim, jak również ujemnym źródłem wody może być znajdujący się w profilu glebowym system drenów. Poprawny opis występujących w profilu glebowym dodatnich i ujemnych źródeł wody jest zadaniem bardzo trudnym i wymaga współpracy specjalistów z wielu dziedzin nauki, szczególnie fizjologów roślin.

Równanie (6) 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:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot ((D_{\theta l} + D_{\theta v}) \nabla \theta) - \nabla \cdot ((D_{Tl} + D_{Tv}) \nabla T) - \nabla K \quad (7)$$

W analogiczny sposób można przedstawić równanie przepływu ciepła:

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \nabla \cdot (D_{\theta v} \nabla \theta) \quad (8)$$

oraz równanie przepływu soli:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla C) - \nabla \cdot (v \cdot C) \quad (9)$$

gdzie:

c_v – pojemność cieplna [$\text{J}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$];

T – temperatura [K];

t – czas [s];

λ – przewodnictwo temperaturowe [$\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$];

L – ciepło przejścia fazowego ciec-z-gaz [J/m^3];

θ – wilgotność [m^3/m^3];

$D_{\Theta v}$ – współczynnik dyfuzji pary w warunkach izotermicznych [m^2/s];

$D_{\Theta l}$ – współczynnik dyfuzji cieczy w warunkach izotermicznych [m^2/s];

D_{Tv} – współczynnik dyfuzji pary w warunkach nieizotermicznych [m^2/s];

D_{Tl} – współczynnik dyfuzji pary w warunkach nieizotermicznych [m^2/s];

C – koncentracja soli [m^3/m^3];

D – współczynnik dyfuzji i dyspersji hydrodynamicznej [m^2/s].

Równania (7), (8), (9) dynamiki wilgotności, temperatury i koncentracji soli są ze sobą powiązane poprzez gradienty poszczególnych wielkości fizycznych. Korzystając z praw termodynamiki można te równania uogólnić wyrażeniem:

$$J_i = \sum_{k=1}^n L_{ik} X_k \quad (10)$$

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:

$$L_{ik} = L_{ki} \quad (11)$$

Powyższa zasada termodynamiki nosi nazwę zasady Onsagera.

Struktura gleby, rozumiana jako konfiguracja jej fazy stałej, oraz wilgotność gleby decydują o przebiegu procesów fizycznych, fizykochemicznych oraz biologicznych. Górna warstwa gleby w procesie technologicznym podlega wielokrotnym naprężeniom i odkształceniom, powodowanym poprzez oddziaływanie kół maszyn i narzędzi rolniczych oraz ich elementów roboczych.

Do opisu zależności naprężenie-odkształcenie w glebie jako ośrodku wykazującym cechy reologiczne tzn. sprężystość, lepkość i plastyczność wykorzystuje się metody termodynamiki procesów nieodwracalnych, z zastosowaniem ra-

chunku tensorowego do analizy pól naprężeń i odkształceń. Procesy odkształcenia, relaksacji naprężeń, jak również proces akumulacji i rozpraszania energii, można przedstawić w postaci równań matematycznych i mechanicznych analogów, konstruując podstawowe modele reologiczne, opisujące relacje naprężenie-odkształcenie, w tym zjawiska pełzania, relaksacji i opóźnienia sprężystego.

Podstawowym modelem opisującym jednocześnie wszystkie efekty reologiczne jest model standardowy wyrażony równaniem [6]:

$$E_1 \cdot E_2 \varepsilon(t) + (E_1 + E_2) \eta \frac{d\varepsilon}{dt} = E_1 \sigma + \eta \frac{d\sigma}{dt} \quad (12)$$

gdzie:

E_1 i E_2 – stałe sprężystości [N/m^2],

η – współczynnik lepkości dynamicznej [Ns/m^2]

ε – odkształcenie,

σ – naprężenie [N/m^2]

Równanie powyższe można rozwiązać poprzez poszukiwanie zależności $\varepsilon(t)$ dla danych funkcji $\sigma(t)$ i odwrotnie. Trójwymiarowy model reologiczny stwarza możliwości wspólnego opisu różnych gleb i gruntów.

Modelowanie procesów fizycznych, zachodzących w systemie gleba-roślina-atmosfera, uzupełnione systemami monitorującymi, umożliwiającymi charakterystykę obiektów i weryfikację modeli, umożliwia poznanie mechanizmów fizycznych zachodzących w systemie, symulowanie tych procesów oraz, co jest najbardziej istotne, przewidywanie stanu systemu przy założonych warunkach brzegowych i modyfikacjach elementów systemu.

Modelowanie umożliwia przewidywanie skutków działalności człowieka, co może uchronić system ekologiczny przed jego degradacją, często niemożliwą do likwidacji.

Badania agrofizyczne związane z modelowaniem procesów fizycznych w systemie gleba-roślina-atmosfera, uzupełnione monitorowaniem badanych układów, są niezmiernie ważne i winny być dynamicznie rozwijane, ponieważ możemy optymalnie wykorzystywać, chronić i kształtować środowisko wtedy i tylko wtedy, jeżeli będziemy dysponować możliwie pełną informacją o fizycznych parametrach, opisujących to środowisko i ich dynamice, tzn. o trendach ich zmian w czasie i przestrzeni [4].

PIŚMIENNICTWO

1. Encyklopedia fizyki współczesnej, PWN, Warszawa, 1983.
2. Kutilek M., Nielsen D. R.: Soil hydrology. Catena Verlag, 38162 Cremlingen-Destedt, 1994.
3. Gliński J., Walczak R.: Role of agrophysics in the concept of sustainable agriculture. Int. Agrophysics. 12, 25-32, 1998.
4. Walczak R., Reszetin O., Czachor H.: Transport water and heat in soil. Polish J. Soil Sci. VII, 1, 19-25, 1974.
5. Gliński J., Stępniewski W.: Soil aeration and its role for plants. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, 1985.
6. Gleboznawstwo, Praca zbiorowa pod redakcją naukową S. Zawadzkiego. PWRiL, Warszawa 1999.

THERMODYNAMICS OF SOIL PROCESSES

R.T. Walczak, C. Sławiński

Institute of Agrophysics, Polish Academy of Sciences, Doświadczalna 4, 20-290 Lublin 27

Summary: The paper presents the possibility of application of the thermodynamic laws for the description of accumulation processes as well as mass and energy transfer in the soil-plant-atmosphere system with special consideration of the phenomena in the soil and for the analysis of the rheological soil properties.

Keywords: agrophysics, thermodynamics, soil physics.