

ANDRZEJ GREGORCZYK

## ZASTOSOWANIE TERMINOLOGII TERMODYNAMICZNEJ W GOSPODARCE WODNEJ ROŚLIN

AN ADAPTATION OF THERMODYNAMIC TERMINOLOGY IN  
THE PLANT WATER MANAGEMENT

### Cel stosowania terminologii termodynamicznej

Klasyczne ujęcie stosunków wodnych w roślinie oparte na pojęciach: siła ssąca, ciśnienie osmotyczne i ciśnienie turgorowe nie odpowiada w pełni stanowi rzeczywistości. Oprócz tych pojęć o ruchu wody decydują także (choć w mniejszym stopniu) siły grawitacji, kapilarne, elektryczne, hydratacji i inne. Dlatego też w badaniach zachowania się wody w układzie gleba — roślina — atmosfera powinno się stosować jednolitą terminologię termodynamiczną opracowaną na Międzynarodowym Sympozjum UNESCO w 1959 roku [7]. Stosowanie wielkości termodynamicznych (w identycznych jednostkach) pozwala na bezpośrednią ocenę stopnia uwodnienia w badanych punktach nie tylko rośliny, ale i gleby.

Termodynamika jest nauką o przemianach różnych form energii. Nauka ta opisuje także przemiany energii towarzyszące procesom fizycznym i reakcjom chemicznym zachodzącym w żywych komórkach. Żywą komórkę można zatem traktować jako układ termodynamiczny wymieniający z otoczeniem masę i energię. Również całą roślinę można uważać za część zamkniętego układu gleba — roślina — atmosfera i stosować (z pewnymi założeniami) zasady termodynamiki. Ujęcie termodynamiczne zastosowane w gospodarce wodnej roślin jest logiczne, spójne i akceptowane przez wszystkich badaczy przyrody.

### Pojęcie potencjału chemicznego

Uwzględniając I i II zasadę termodynamiki w przypadku układu jednoskładnikowego można napisać:

$$dU = dF + TdS \quad (1)$$

gdzie:  $U$  — energia wewnętrzna układu (tj. suma energii translacyjnej, oscylacyjnej, elektronowej i jądrowej),  $F$  — energia swobodna,  $T$  — temperatura bezwzględna,  $S$  — entropia.

Równanie to jest słuszne w warunkach izotermicznych. Energia swobodna określa tę część energii wewnętrznej, która w każdym układzie może być zamieniona na pracę. Iloczyn  $TdS$  oznacza energię związaną, nieużyteczną, wynikającą z ograniczenia odwracalności przemiany ciepła w inną formę energii. Energia swobodna wyznacza także kierunek procesu w warunkach stałej temperatury i objętości.

Warunek izochoryczności w procesach biologicznych nie zawsze jest spełniony. Z tego względu biolodzy posługują się częściej pojęciem entalpii:

$$dH = dG + TdS \quad (2)$$

gdzie:  $H$  — entalpia,  $G$  — entalpia swobodna.

Rolę, jaką w procesach izotermiczno-izochorycznych odgrywa energia swobodna, w przemianach izotermiczno-izobarycznych spełnia entalpia swobodna.

Entalpia swobodna, zwana również energią swobodną Gibbsa, stanowi część energii, która może być zamieniona na pracę w układach biologicznych. Zmiana entalpii swobodnej ( $\Delta G$ ) określa kierunek przebiegu reakcji biochemicznej i procesu biofizycznego (przy  $p, T = \text{const.}$ ). Jeżeli  $\Delta G$  jest ujemne, to proces jest samorzutny i egzoergiczny; jeżeli  $\Delta G$  jest dodatnie, to mamy do czynienia z procesem endoergicznym. W układzie znajdującym się w stanie równowagi, w którym nie zachodzą żadne przemiany, entalpia swobodna nie zmienia się ( $\Delta G = 0$ ). Tak więc entalpia swobodna (potencjał termodynamiczny) jest funkcją stanu wyrażającą siłę napędową procesów biologicznych.

W układzie wieloskładnikowym, jakim jest np. roztwór glebowy czy sok komórkowy, energia wewnętrzna  $U$  i entalpia swobodna  $G$  zależą również od ilości danych substancji. Analogicznie do równania w układzie jednoskładnikowym:

$$dU = TdS - pdV \quad (3)$$

gdzie:  $p$  — ciśnienie,  $V$  — objętość,

różniczka zupełna energii wewnętrznej w układzie wieloskładnikowym przybierze postać:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial d}\right)_{v,n_i} dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_{s,n_i} dV + \sum \left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{s,v,n_j} dn_i \quad (4)$$

gdzie:  $n_i$  — liczba moli składnika  $i$ ,  $n_j$  — liczba moli wszystkich składników oprócz  $i$ .

Tak więc w układach wieloskładnikowych każdy ze składników ma swoją cząstkową energię wewnętrzną, zależną od entropii, objętości oraz składu układu.

Wielkość

$$\mu_i = \left(\frac{\partial U}{\partial n_i}\right)_{s,v,n_j} \quad (5)$$

określa się jako cząstkową molową energię wewnętrzną składnika  $i$  i nazywa się potencjałem chemicznym tego składnika [3]. Przez analogię można wyrazić potencjał

chemiczny jako pochodną cząstkową entalpii swobodnej względem liczby moli składnika  $i$  ( $\bar{G}_i$ ).

$$\mu_i = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{p,T,n_j} = \bar{G}_i \quad (6)$$

Tak określony potencjał chemiczny wyraża udział jednego mola danej substancji w zmianie entalpii swobodnej całego wieloskładnikowego układu przy ustalonych: ciśnieniu, temperaturze i liczbie moli wszystkich składników oprócz  $i$ . Potencjał chemiczny jest wielkością intensywną, niezależną od masy układu; jego jednostką w układzie SI jest  $J \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Potencjał chemiczny każdego składnika, a więc i wody, określa zdolność tego składnika do wykonania pracy w danym układzie. Różnica wartości potencjałów chemicznych wody w różnych punktach układu powoduje, że zachodzą w nim procesy fizyczne lub reakcje chemiczne zmieniające skład układu, związane z transportem tego związku. Zmiana entalpii swobodnej w wyniku zmiany liczby moli danego składnika nosi często nazwę pracy chemicznej [5].

Zmiany potencjału chemicznego można podobnie jak i inne wielkości intensywne mierzyć w dowolnym punkcie układu. W praktyce potencjał chemiczny może być czynnikiem determinującym ruch wody w glebie, roślinie i atmosferze.

### Potencjał chemiczny w roztworach

Biologów zajmujących się gospodarką wodną roślin interesuje potencjał chemiczny w układach wieloskładnikowych. Może on być oczywiście określony w układach o dowolnym stanie skupienia. Dalsze nasze rozważania dotyczyć będą zmian potencjału chemicznego składnika  $i$  w warunkach izotermicznych.

Z podstawowego równania Gibbsa [1]:

$$dG = -SdT + Vdp + \sum \mu_i dn_i \quad (8)$$

wynika, że

$$\bar{V}_i = \left( \frac{\partial \bar{G}_i}{\partial p} \right)_T = \left( \frac{\partial \mu_i}{\partial p} \right)_T \quad (9)$$

gdzie:  $\bar{V}_i$  — cząstkowa objętość molowa składnika  $i$ .

Zmieniając stan układu od ciśnienia początkowego  $p_{0i}$  do ciśnienia końcowego  $p_i$ , odpowiadającą tej przemianie zmianę potencjału chemicznego otrzymamy z równania:

$$\Delta \mu_i = \int_{p_{0i}}^{p_i} \bar{V}_i(p, T) dp_i \quad (10)$$

Dla gazu doskonałego:

$$\bar{V}_i = \frac{RT}{p_i}; R = 8,31 J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (11)$$

Stąd

$$\Delta\mu_i = \int_{p_{0i}}^{p_i} (R \cdot T/p_i) dp_i = RT \ln (p_i/p_{0i}) \quad (12)$$

lub

$$\mu_i - \mu_{0i} = RT \ln (p_i/p_{0i}) \quad (13)$$

Równanie (13) można odnieść także do roztworów doskonałych (czyli nieskończenie rozcieńczonych). Wtedy  $\mu_{0i}$  oznacza potencjał chemiczny czystego składnika w ustalonych warunkach ciśnienia i temperatury (tzw. potencjał standardowy), a  $p_{0i}$  — ciśnienie pary nasyconej składnika  $i$ .

Do roztworów idealnych odnosi się prawo Raoula. Podaje ono zależność pomiędzy ciśnieniem cząstkowym danego składnika w fazie gazowej  $p_i$  i jego ułamkiem molowym w cieczy  $x_i$ :

$$p_i = x_i \cdot p_{0i} \quad (14)$$

Wówczas równanie (13) przybierze postać

$$\mu_i - \mu_{0i} = RT \ln x_i \quad (15)$$

W roztworach rzeczywistych, jakimi są sok komórkowy i roztwór glebowy, istnieją wzajemne oddziaływania cząsteczek lub jonów. Objawem tych oddziaływań jest nieliniowa zależność parametrów fizykochemicznych od stężenia danych składników [2]. Dlatego w przypadku roztworów rzeczywistych w miejsce ułamka molowego wprowadza się aktywność  $a_i$ :

$$\mu_i - \mu_{0i} = RT \ln a_i \quad (16)$$

Jeżeli za składnik  $i$  przyjmiemy wodę, to równanie (16) obrazować będzie zależność pomiędzy potencjałem chemicznym wody a jej aktywnością:

$$\mu_w = \mu_{0w} + RT \ln a_w \quad (17)$$

Potencjał chemiczny wody może być także funkcją innych wielkości, np. sił adsorpcyjnych czy grawitacji.

### Potencjał wody

Ponieważ nie można wyznaczyć bezwzględnych wartości potencjału chemicznego wody z równania (17), w praktyce operuje się różnicą potencjałów  $\mu_w - \mu_{0w}$ . Symbol  $\mu_w$  oznacza potencjał chemiczny wody w konkretnym punkcie układu (rośliny, gleby). Zakładając, że potencjał chemiczny czystej wody  $\mu_{0w}$  pod normalnym ciśnieniem atmosferycznym wynosi 0, różnicę  $\mu_w - \mu_{0w}$  można zawsze obliczyć.

Wyrażenie  $\mu_w - \mu_{0w}$  jest miarą zdolności wody w danym punkcie układu do wykonania pracy w porównaniu ze zdolnością, jaką posiada czysta woda. Różnicę potencjałów chemicznych wody w danym miejscu i w czystej wodzie przypadającą

na jednostkę cząstkowej molowej objętości wody  $\bar{V}_w$  przyjęto nazywać potencjałem wody  $\Psi_w$ :

$$\Psi_w = \frac{\mu_w - \mu_{0w}}{\bar{V}_w} \quad (18)$$

Wartość potencjału wody można podawać w jednostkach energii na jednostkę objętości (np.  $\text{Jm}^{-3}$ ) czyli w jednostkach ciśnienia (Pa), lub też w  $\text{Jkg}^{-1}$ , czy  $\text{Jmol}^{-1}$ .

Potencjał wody jest termodynamiczną wielkością powszechnie stosowaną przez fizjologów i gleboznawców przy opisie stosunków wodnych w roślinie i glebie. Transport wody odbywa się zawsze w kierunku niższych wartości potencjału wody  $\Psi_w$ . W stanie równowagi istnieje w układzie równość potencjałów wody ( $\Delta\Psi = 0$ ). Tak więc gradient potencjału wody jest ostatecznym wyznacznikiem ruchu wody w glebie, roślinie i atmosferze lub pomiędzy tymi układami.

### Potencjał wody w roślinie

Na stan wody w roślinie oddziałują przede wszystkim siły osmotyczne, siły pęcznienia oraz siły ciśnienia turgorowego. A więc na wartość potencjału wody w roślinie mają wpływ właśnie te czynniki:

$$\Psi_w = \Psi_0 + \Psi_p + \Psi_m \quad (T = \text{const.}) \quad (19)$$

gdzie:  $\Psi_0$  — potencjał osmotyczny,  $\Psi_p$  — potencjał ciśnienia,  $\Psi_m$  — potencjał macierzysty.

Oczywiście wszystkie wielkości w równaniu (19) muszą być wyrażone w tych samych jednostkach.

Potencjał osmotyczny  $\Psi_0$  powstaje dzięki obecności cząstek substancji rozpuszczonych w wodzie. Ten składnik potencjału wody omówiony zostanie dokładniej w dalszej części pracy.

Potencjał ciśnienia  $\Psi_p$  jest na ogół równy ciśnieniu turgorowemu. Może on mieć wartość ujemną lub dodatnią. Bezpośrednie pomiary potencjału ciśnienia w komórkach roślinnych są bardzo utrudnione.

Potencjał macierzysty lub potencjał substancji podstawowej  $\Psi_m$  (ang. matrix potential) wynika z obecności koloidów i ich zdolności do pobierania wody na drodze pęcznienia. Wysuszone koloidy mają ujemne wartości potencjału macierzystego (nawet do  $-300$  MPa), natomiast koloidy całkowicie uwodnione czystą wodą pod ciśnieniem atmosferycznym wykazują  $\Psi_m = 0$ .

Traktując komórkę roślinną z termodynamicznego punktu widzenia można w uproszczeniu napisać następujące równania potencjału wody jej trzech podstawowych części [10]:

$$\text{wakuoli:} \quad \Psi_w = \Psi_0 + \Psi_p \quad \Psi_m = 0 \quad (19a)$$

$$\text{cytoplazmy:} \quad \Psi_w = \Psi_0 + \Psi_p + \Psi_m \quad (19b)$$

$$\text{ściany komórkowej:} \quad \Psi_w = \Psi_m \quad \Psi_0 = \Psi_p = 0 \quad (19c)$$

Potencjał wody w roślinie jest na ogół ujemny ze względu na dominujący wpływ potencjałów osmotycznego i macierzystego. W zjawiskach gutacji i „płaczu roślin” potencjał wody ma wartość dodatnią.

Klasyczne (wg terminologii Höflera) równanie stosunków wodnych w idealnie osmotycznej komórce roślinnej:

$$S = P - T \quad (20)$$

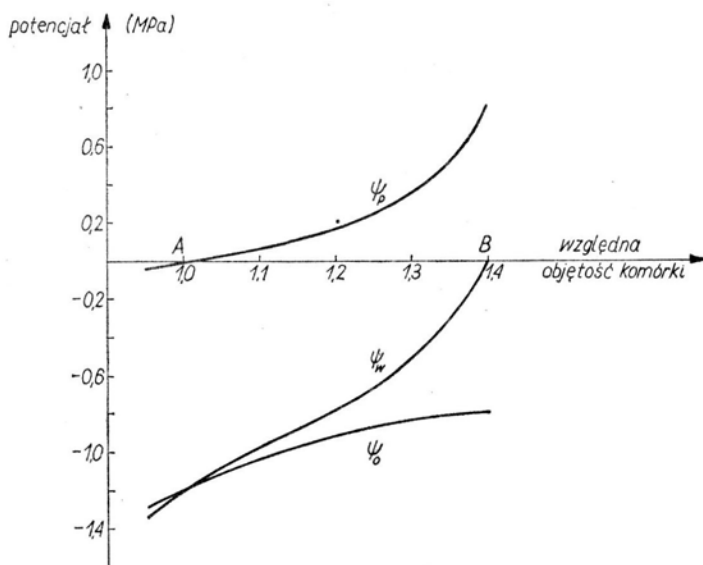
gdzie:  $S$  — siła ssąca,  $P$  — ciśnienie osmotyczne,  $T$  — turgor.  
w nomenklaturze termodynamicznej przybierze postać:

$$\Psi_w = \Psi_0 + \Psi_p \quad (21)$$

Wtedy pomiędzy klasycznymi i nowymi wielkościami istnieją następujące zależności:

$$\Psi_w = -S \quad \Psi_0 = -P \quad \Psi_p = T \quad (22)$$

Równanie 21 można także przedstawić graficznie (ryc. 1).



Ryc. 1. Zależność pomiędzy potencjałem ciśnienia  $\Psi_p$ , potencjałem osmotycznym  $\Psi_0$  i potencjałem wody  $\Psi_w$  w komórce roślinnej

Punkt  $A$  charakteryzuje stan turgoru zerowego ( $\Psi_p = 0$ ;  $\Psi_w = \Psi_0$ ), a punkt  $B$  stan pełnego turgoru ( $\Psi_w = 0$ ;  $\Psi_0 = -\Psi_p$ ).

W stanie turgoru przybliżone skrajnie wartości potencjału wody w liściach wahają się w granicach  $-1,5 \div -0,2$  MPa. Natomiast u rośliny wysychającej wartości te są oczywiście mniejsze (bardziej ujemne):  $-3,0 \div -1,5$  MPa [4].

## Potencjał osmotyczny

Według koncepcji termodynamicznej potencjał osmotyczny  $\Psi_0$  jest komponentem całkowitego potencjału wody. Potencjał osmotyczny jest zawsze ujemny, ponieważ zgodnie z umową czysta woda pod ciśnieniem atmosferycznym posiada wartość potencjału równą zero, a obecność cząstek substancji rozpuszczonych obniża zdolność wody do wykonania pracy. Tradycyjnie i niezupełnie słusznie stosowane terminy: ciśnienie osmotyczne, stężenie osmotyczne, zostały zastąpione określeniami termodynamicznymi.

Proces osmozy wynika z nierówności potencjałów chemicznych wody roztworów po obu stronach błony półprzepuszczalnej. Większą cząstkową molową entalpię swobodną wody ma czysty rozpuszczalnik niż jego roztwór. W procesie osmozy czysta woda (o większym potencjale) dyfundując do roztworu wykonuje pewną pracę, której odpowiednikiem jest ujemna wartość potencjału osmotycznego danego roztworu [6].

Opierając się na rozważaniach termodynamicznych można wyprowadzić równanie ujmujące zależność pomiędzy potencjałem osmotycznym oraz aktywnością wody w roztworze. Równanie to przybiera następującą postać:

$$\Psi_0 = \frac{RT}{\bar{V}_w} \ln a_w \quad (23)$$

Natomiast znane równanie Van't Hoffa określające ciśnienie osmotyczne:

$$P = cRT \quad (24)$$

gdzie:  $c$  — stężenie molowe nieelektrolitu jest zależnością przybliżoną, dającą często znaczne rozbieżności z wynikami eksperymentalnymi.

Potencjał osmotyczny soku komórkowego waha się w szerokich granicach w zależności od gatunku i wieku rośliny. U naszych roślin uprawnych wynosi on przeciętnie  $-1,0 \div -0,5$  MPa. Natomiast u niektórych kserofitów i halofitów może osiągać bardzo niskie wartości, np. u łobody *Atriplex confertifolia* do  $-20$  MPa [8].

## Potencjał wody w glebie

Często używany wskaźnik zawartości wody w glebie nie odzwierciedla w pełni dostępności wody dla roślin. O wiele lepszym miernikiem jest tu termodynamiczna wielkość: potencjał wody glebowej.

Potencjał wody glebowej jest to ilość pracy, którą należy wykonać na jednostkę ilości czystej wody w celu przemieszczenia odwracalnego i izotermicznego nieskończenie małej ilości wody ze zbiornika z czystą wodą, będącego pod ciśnieniem atmosferycznym i na określonej wysokości, do wody glebowej w rozpatrywanym punkcie [9]. Sens fizyczny potencjału wody w glebie jest taki sam, jak potencjału wody w roślinie; wyraża on zdolność wody glebowej do wykonania pracy w porównaniu ze zdolnością wody czystej, przy czym wartość potencjału czystej wody przyjęto umownie równą zero.

Potencjał wody można wyrażać w jednostkach energii na jednostkę masy ( $\text{J kg}^{-1}$ ), objętość ( $\text{J m}^{-3} = \text{Pa}$ ) lub na mol ( $\text{J mol}^{-1}$ ).

Na stan wody glebowej wpływać mogą: ciśnienie hydrostatyczne, temperatura i stężenie roztworu glebowego oraz działanie sił adsorpcyjnych i sił pól zewnętrznych (np. pola grawitacyjnego). Wobec tego całkowity potencjał wody w glebie będzie sumą kilku potencjałów obrazujących działanie tych sił. Zakładając warunki izotermiczne można napisać:

$$\Psi_w = \Psi_0 + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g \quad (25)$$

gdzie:  $\Psi_w$  oznacza potencjał wody glebowej,  $\Psi_g$  — potencjał grawitacyjny, a  $\Psi_0$ ,  $\Psi_p$ ,  $\Psi_m$  mają taki sam sens jak w równaniu (19).

Potencjał osmotyczny  $\Psi_0$  jest oczywiście zawsze ujemny. Jego wartość w glebach niezasolonych jest na ogół mała i może być pominięta. Poczynając od wartości  $\Psi_0 = -1,5 \text{ MPa}$  składową osmotyczną należy już uwzględniać, a w glebach zasolonych jest ona główną częścią potencjału wody.

Potencjał ciśnienia  $\Psi_p$  wynika z ciśnienia hydrostatycznego wywieranego przez poziom wody gruntowej. Jest on dodatni poniżej poziomu wody w glebach nasyconych oraz ujemny w glebach w stanie nienasyceńca. Bardzo często wartości potencjału ciśnieniowego są pomijane.

Potencjał macierzysty  $\Psi_m$  uwzględnia wpływ sił sorpcyjnych na granicy faz: ciało stałe — ciecz i ciecz — gaz. Najsilniej adsorbowana jest woda wiązaniami wodorowymi z koloidami glebowymi. Ponadto większe ilości wody w glebie mogą być związane siłami kapilarnymi. W glebach nasyconych potencjał macierzysty jest równy zeru, a w glebach nienasyconych jest ujemny. Woda silnie związana z cząstkami glebowymi jest niedostępna dla roślin. Woda zaczyna być dostępna dla roślin, jeżeli jej zawartość przekracza tzw. wilgotność trwałego wędnięcia. W punkcie tym u większości gleb wartość potencjału macierzystego wynosi około  $-1,5 \text{ MPa}$  [4].

Wpływ pola grawitacyjnego uwzględnia potencjał grawitacyjny  $\Psi_g$ . Potencjał grawitacyjny wynika ze zmiany w położeniu masy wody względem określonego poziomu odniesienia, a jego interpretacja opiera się na zasadach mechaniki. W glebach nasyconych wodą  $\Psi_g$  odgrywa znaczną rolę.

Potencjał wody w glebach nasyconych zawiera się w przybliżonym przedziale  $-1,0 \div -0,01 \text{ MPa}$ , a w przypadku zjawiska suszy glebowej od  $-3,0 \text{ MPa}$  do  $-1,5 \text{ MPa}$  [4].

### Potencjał pary wodnej w atmosferze

Termin „potencjał wody”, oprócz gleby i rośliny dotyczy również powietrza. Powietrze całkowicie nasycone parą wodną (w danej temperaturze) ma potencjał wody równy zeru. Powietrze o wilgotności względnej mniejszej od 100% charakteryzuje się ujemnymi wartościami potencjału wody. Suche powietrze posiada dużą zdolność do odbierania wody od ciał wilgotnych, np. od roślin.

Można określić teoretyczną zależność pomiędzy potencjałem wody w atmosferze a wilgotnością względną powietrza  $\varphi$ :

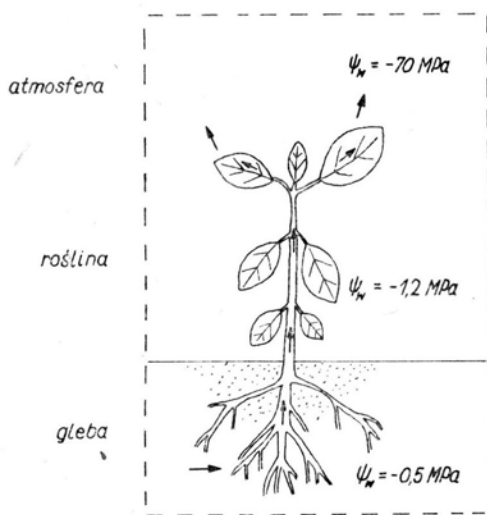


$$\Psi_w = \frac{RT}{V_w} \ln(p/p_0) = \frac{RT}{V_w} \ln \varphi \quad (26)$$

gdzie:  $p$  — prężność pary wodnej w badanym powietrzu,  $p_0$  — prężność nasyconej pary wodnej w danej temperaturze.

W praktyce określenie potencjału pary wodnej w powietrzu sprowadza się do bardzo dokładnego wyznaczenia temperatury oraz prężności pary lub wilgotności względnej. Należy przy tym zauważyć, że niewielkie zmiany wilgotności wywołują znaczne zmiany potencjału wody. W warunkach naturalnych potencjał pary wodnej w powietrzu osiąga na ogół bardzo małe wartości: od  $-200$  MPa do  $-10$  MPa [4]. Na przykład w temperaturze  $293$  K ( $20^\circ\text{C}$ ) i przy wilgotności względnej  $60\%$  potencjał wody wynosi  $-69,0$  MPa. Duży gradient potencjału wody pomiędzy atmosferą i liściem jest czynnikiem wyjaśniającym dynamiczny proces transpiracji.

Na rycinie 2 przedstawiono ruch wody w zamkniętym układzie gleba — roślina — atmosfera.



Ryc. 2. Ruch wody w układzie gleba—roślina—atmosfera

Wartości potencjałów wody w glebie ( $\Psi_w = -0,5$  MPa), liściach ( $\Psi_w = -1,2$  MPa), powietrzu ( $\Psi_w = -70,0$  MPa) są hipotetyczne, chociaż prawdopodobne. Transport wody odbywa się z miejsc o wyższej wartości potencjału wody do miejsc o niższej wartości, a więc z gleby przez roślinę do atmosfery.

### Podsumowanie

Zadaniem niniejszej pracy było krótkie przedstawienie zagadnień związanych z upowszechnieniem terminologii termodynamicznej w gospodarce wodnej roślin, gdyż w literaturze polskiej nie spotyka się zbyt wielu wyczerpujących publikacji na ten temat [9, 11]. Autorowi tego opracowania chodziło przede wszystkim o wypro-

wadzenie z zasad termodynamiki nowych terminów i definicji mających zastosowanie w fizjologii roślin oraz o podkreślenie zalet nowej koncepcji stosunków wodnych.

Koncepcja termodynamiczna posługuje się stanem entalpii swobodnej wyrażonym przez potencjał chemiczny, co pozwala uwzględnić wszystkie czynniki odpowiedzialne za transport wody. Ponadto nowe terminy i określenia przedstawione są za pomocą przejrzystych praw fizyko-chemicznych i równań matematycznych.

Terminologia termodynamiczna, dzięki swojej uniwersalności, jak najbardziej zasługuje na szerokie rozpowszechnienie w naukach biologicznych.

### Literatura

- [1] Brdička R., 1970. Podstawy chemii fizycznej. Warszawa, PWN.
- [2] Glaser R., 1975. Wstęp do biofizyki. Warszawa, PZWL.
- [3] Meidner H., Sheriff D. W., 1976. Water and plants. Glasgow and London, Blackie.
- [4] Milthorpe F. L., Moorby J., 1979. Wstęp do fizjologii plonowania roślin. Warszawa, PWRiL.
- [5] Pilawski A. red., 1981. Podstawy biofizyki. Warszawa, PZWL.
- [6] Salisbury B., Ross C., 1975. Fizjologia roślin. Warszawa, PWRiL.
- [7] Slatyer R. O., 1960. Absorption of water by plants. The Bot. Rev., vol. 26, 332—392.
- [8] Strebeyko P., 1976. Procesy biofizyczne w roślinie. Warszawa, PWN.
- [9] Ślusarczyk E., Kośmider E., 1978. Potencjał wody w glebie i roślinie oraz metody jego oznaczania. Wrocław, Ossolineum.
- [10] Walter H., Kreeb K., 1970. Die Hydratation und Hydratur des Protoplasmas der Pflanzen und ihre öko-physiologische Bedeutung. Wien-New York, Springer Verlag.
- [11] Zielińska D., 1971. Terminologia stosunków wodnych w komórce roślinnej. Wiad. Bot. XV, z. 3, 175—183.

Mgr inż. Andrzej Gregorczyk

Katedra Fizjologii Roślin AR, ul. Słowackiego 17, 71—434 Szczecin