

TEMPERATURA LIŚCI JAKO MIERNIK TRANSPIRACJI POMIDORÓW SZKLARNIOWYCH

S. Kurpaska

Katedra Mechanizacji Rolnictwa, Akademia Rolnicza, ul. Balicka 104, 30-149 Kraków
e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl

Streszczenie. W opracowaniu podjęto próbę określenia transpiracji roślin w zależności od temperatury liści. Przeanalizowano również dodatkowo wzajemną współzależność między oporem przeniesienia pary wodnej z liści do otaczającej atmosfery a ich temperaturą. Część eksperymentalną przeprowadzono w szklarni, w której uprawiano pomidory. Uzyskane wyniki przedstawiono w formie graficznej i znaleziono zależności opisujące zmianę transpiracji oraz oporu fizjologicznego w zależności od temperatury liści. Stwierdzono istotne korelacje między transpiracją roślin oraz wielkością oporu fizjologicznego a temperaturą liści. Dodatkowo wykazano, że wykorzystując minimalną liczbę parametrów otaczającego środowiska oraz uprawianych roślin, określanych za pomocą standardowych przyrządów pomiarowych, można z przybliżeniem szacować wymaganą masę pożywki dla ich systemu korzeniowego.

Słowa kluczowe: temperatura liści, transpiracja, opór fizjologiczny, pomidory.

WSTĘP

Szacowanie ilości wody wydalanej przez komórki uprawianych w szklarni roślin posiada zarówno znaczenie poznawcze jak i aplikacyjne. Dostosowanie ilości dostarczanej wody do uprawianych roślin wpływa bowiem nie tylko na minimalizację jej zużycia ale również na ograniczenie wentylacji obiektu a tym samym zmniejszenie zużycia ciepła. Szczególnego znaczenia, ze względu na aspekty ekologiczne, nabiera więc dostarczenie odpowiedniej ilości pożywki do systemu korzeniowego przy uprawie roślin szklarniowych w wełnie mineralnej. Teoretycznie, ilość pożywki dostarczanej dla roślin można określać wykorzystując modele matematyczne procesu transpiracji Kurpaska [10], jednakże do

ich stosowania wymagana jest znajomość wartości szeregu, niekiedy trudno mierzalnych parametrów. Stąd celowe wydaje się poszukiwanie zależności opisujących transpirację przy ograniczeniu parametrów wejściowych. Zagadnienie to było przedmiotem szerokiej analizy, jednakże autorzy wyniki badań prezentowali dla upraw typowo rolniczych. I tak, Baranowski [3] analizował zjawisko ewapotranspiracji z wykorzystaniem radiacyjnego pomiaru temperatury wierzchniej warstwy gleby pokrytej roślinnością. W konkluzji autor stwierdził, że zastosowana metoda w porównaniu z pomiarami lizymetrycznymi cechuje dużą zgodność, może więc być wykorzystana do stwierdzenia zbliżającego się lub trwającego stresu wodnego uprawianych roślin. Mazurek [13] w wyniku analizy stwierdził, że radiacyjna technika pomiaru temperatury roślin nie może być wykorzystana do oceny ilości zretencjonowanej w glebie wody, może być zaś skuteczna do oceny stresu wodnego roślin. Baranowski i in. [4] przedstawili schemat określania ewapotranspiracji potencjalnej i rzeczywistej z wykorzystaniem urządzenia termograficznego mierzącego temperaturę powierzchni roślin. Ewapotranspirację potencjalną określono wykorzystując metodę Penman'a-Monteith'a, zaś rzeczywistą wykorzystując metodę lizymetryczną. Chehbouni i in. [5] analizowali temperaturę napromieniowanych liści, stwierdzając że uwzględnienie w obliczeniach temperatury radiacyjnej pozwala wiarygodnie szacować strumienie ciepła wymieniane między powierzchnią gleby (wraz z roślinami) a otoczeniem. Zaproponowali metodę oceniającą temperaturę radiacyjną oraz właściwości aerodynamiczne łanu roślin z uwzględnieniem pionowego rozdziału liści. Mo i Liu [14] opracowali model procesu ewapotranspiracji roślin, w którym w celu opisu transferu strumieni masy, energii i CO_2 roślinę podzielili na skończoną liczbę warstw z uwzględnieniem zróżnicowanego dopływu energii słonecznej do powierzchni liścia. Walidację modelu przeprowadzono dla całego okresu wegetacji stwierdzając w konkluzji, że przedstawiony model prawidłowo opisuje procesy transportu ciepła i masy w analizowanym systemie. Katsoulas i in. [9] analizowali wpływ wilgotności powietrza na transpirację, strumień ciepła (konwekcyjny i z przemiany fazowej) oraz przewodnictwo listowia dla róż uprawianych w szklarni. Przewodnictwo listowia podczas pogody radiacyjnej, przy uwzględnieniu deficytu ciśnienia pary wodnej (vpd), określali z modelu Penman'a-Monteith'a. W konkluzji stwierdzono, że w celu prawidłowej oceny wielkości transpiracji z analizowanych roślin, w analizie musi być uwzględniona dobowo zmienność vpd. Tourula i Heikinheimo [19] do opisu procesu ewapotranspiracji z plantacji jęczmienia opracowali własny model składający się z dwóch członów, a mianowicie z członu opisującego wierzchnią warstwę gleby

oraz strefę korzeniową roślin. W członie opisującym strefę korzeniową uwzględniono zmienną oporność listowia dla transportu pary wodnej. W modelu uwzględniona została temperatura wierzchniej warstwy oraz parametry fizyczne otaczającego powietrza. Stwierdzono, że opracowany model, cechuje duża przydatność dla praktyki produkcyjnej. Lhomme i Monteny [11] analizowali relację między oporem przewodnictwa pary wodnej przez listowie i temperaturą liścia oraz gleby. Stwierdzono współzależność oporności i temperatury liścia oraz słabą zależność tych wielkości od temperatury gleby. Dauzat i in. [6] analizowali przewodnictwo pary wodnej przez listowie na podstawie bilansu energii dla pojedynczych liści i całego łanu. W strukturze wewnętrznej opracowanego modelu uwzględniono sprzężenia zwrotne między temperaturą liścia, transpiracją, potencjałem wody glebowej a wodą zgromadzoną w liściach i przewodnictwem wody wewnątrz liścia. Model został pozytywnie zweryfikowany w warunkach rzeczywistych. Anderson i in. [1] opracowali model określający opór przewodzenia pary wodnej i asymilacji CO₂ z uwzględnieniem wykorzystania przez roślinę światła PAR. Model uwzględnia zmienność warunków zewnętrznych (otaczająca atmosfera i wilgotność gleby). Eksperymenty weryfikacyjne wykazały zadawalającą zgodność między zmierzonymi i obliczonymi wartościami transpiracji i asymilacji. Hanan i Prince [7] analizowali przewodnictwo pary wodnej przez liście roślin w zależności od intensywności nasłonecznienia, deficytu ciśnienia pary wodnej w powietrzu oraz potencjału wody glebowej. Stwierdzono, że temperatura otoczenia nie ma istotnego wpływu na przewodnictwo, z kolei przewodnictwo zależy od pory dnia. Jones [8] analizował możliwość wykorzystania techniki radiacyjnej do oceny przewodności wodnej liścia z uwzględnieniem stresu wodnego roślin. Stwierdzono, że zastosowana technika pomiarowa może być przydatna do oceny potencjalnego stresu wodnego, a tym samym oceny potrzeb nawodnieniowych. Baldocchi i Meyers [2] do obliczenia strumieni energii i masy wymienianych między roślinami a otaczającym powietrzem wykorzystali ogólną teorię fizjologiczną, biochemiczną i mikrometeorologiczną. Rozważali teoretycznie wzajemne interakcje między parametrami klimatu a procesem fotosyntezy, wegetacji roślin oraz zmianą powierzchni liści. Stwierdzili, że zaproponowane modele można wykorzystać do estymacji zjawisk w skali makro. Lhomme i in. [12] opracowali model nieustalonego przepływu soku komórkowego wraz z jego magazynowaniem w roślinach. W modelu uwzględniono człon magazynujący i opór przepływu soku przez roślinę. Model transpiracji opisali wykorzystując zależność Penman'a-Monteith'a. Stwierdzono, że model prawidłowo opisuje przepływ soku, zaś zaobserwowano duże rozbieżności w opisie jego magazy-

nowania. Montero i in. [15] określali transpirację kwiatów doniczkowych w warunkach niskiej wilgotności i wysokiej temperatury powietrza. Zmierzoną transpirację porównano z modelem Penman'a- Monteith'a, w którym wprowadzili współczynnik zaniku promieniowania i powierzchnię liścia. Teoretyczny opór listowia uzależnili tylko od natężenia promieniowania słonecznego. Stwierdzono, że w badanym zakresie deficytu ciśnienia cząstkowego pary wodnej oraz temperatury otoczenia parametry te można pominąć w analizie oporu liścia. Moran i in. [16] analizując ewaporację pary wodnej (określoną z modelu Penman'a- Monteith'a) stwierdzili, że model ten prawidłowo opisuje proces wymiany energii dla jednorodnych obszarów, zaś dla obszarów heterogenicznych pojawiają się rozbieżności między wartościami obliczonymi i zmierzonymi. Stąd, dokonali modyfikacji tego modelu uwzględniając w nim temperaturę gleby oraz temperaturę odbicia uzależniając ją dodatkowo od stanu uwilgotnienia gleby oraz od wielkości zajmowanej przez liście. Dokonali porównania obliczonej i zmierzonej ewaporacji uzyskując zadawalającą zgodność wyników. Oliosio i in. [17] analizowali zależność między potencjałem wody zgromadzonej w liściach a jego przewodnością dla pary wodnej i fotosyntezą. Stwierdzono, że jeśli potencjał osiągnie krytyczną wartość, występuje sprzężenie zwrotne skierowane w stronę zmiany transpiracji. Zarówno przewodność listowia jak i fotosynteza maleje wraz ze wzrostem deficytu ciśnienia pary wodnej w powietrzu. Wang i Leuning [20] opracowali model do obliczania konwekcyjnego i z przejścia fazowego strumienia ciepła oraz fotosyntezy dla listowia. W modelu uwzględniono interakcję między strumieniami ciepła i fotosyntezą oraz przewodnością pary wodnej przez listowie i deficytem pary wodnej w otaczającym powietrzu i w glebie. W konkluzji stwierdzono, że model ten do obliczeń wymaga komputerów o mniejszej mocy obliczeniowej, maksymalne różnice między zmierzonymi i obliczonymi strumieniami ciepła nie przekraczają 5%. Zhan i Kustas [21] opracowali model równoczesnej transpiracji i fotosyntezy roślin w którym uwzględnili własności aerodynamiczne przyziemnej warstwy atmosfery. W danych wejściowych modelu zawarli standardowe wielkości meteorologiczne (parametry fizyczne powietrza oraz koncentracja CO₂) oraz parametry charakteryzujące rodzaj i wielkość roślin. Danymi wyjściowymi były konwekcyjny i z przejścia fazowego strumień ciepła, transpiracja oraz temperatura powierzchni liścia. Obliczoną temperaturę powierzchni porównano z pomiarem radiacyjnym. Otrzymano dużą zgodność wyników zarówno dla temperatury jak i transpiracji roślin.

Z przeglądu dostępnej literatury wynika, że autorzy do szacowania intensywności procesu transpiracji modyfikowali standardowe równanie Bowen'a lub Penman'a- Monteith'a uwzględniając jedynie wybrane parametry. Niektórzy

badacze uwzględniali temperaturę liści lub opisywali łącznie z transpiracją proces fotosyntezy czy też uwzględniali parametry fizyczne otaczającego powietrza oraz potencjał wody glebowej i w liściu. Celowe jest więc przeanalizowanie procesu transpiracji uwzględniając minimalną liczbę parametrów otaczającego środowiska określonych za pomocą standardowych przyrządów pomiarowych. Określenie zależności między transpiracją a temperaturą liści będzie głównym celem pracy.

MATERIAŁ I METODA

Badania eksperymentalne przeprowadzono w szklarni, w której uprawiano pomidory (odm. *Marathon*)*. W eksperymencie monitorowano parametry fizyczne powietrza zewnętrznego i wewnątrz szklarni oraz metodą radiacyjną temperaturę listowia pomidorów. Przy wykorzystaniu metody lizymetrycznej mierzono również dobową transpirację roślin. Dodatkowo mierzona była powierzchnia liści pomidorów rosnących w lizymetrze. Parametry fizyczne powietrza, temperaturę liści oraz transpirację pomidorów monitorowano co każde 2 minuty, zaś w odstępie tygodniowym powierzchnię liści.

Transpirację pomidorów (E_T), przy pominięciu przypadkowych i systematycznych błędów pomiaru, obliczono ze wzoru:

$$E_T = \frac{dW}{dt} \cdot \frac{1}{LA} \approx \frac{W_1 - W_2}{(t_1 - t_2) \cdot LA} \quad [\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

Temperaturę powierzchni listowia (t_l), obliczono wykorzystując prawo Stefana-Boltzmana:

$$Q_r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_l^4 - T^4) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (2)$$

Po przekształceniu zależność ta przyjmuje postać:

$$t_l = \left(\frac{Q_r}{\sigma \cdot \varepsilon} + T^4 \right)^{0,25} - 273,15 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2a)$$

Dodatkowo, znając wartości parametrów klimatu wewnątrz szklarni, obliczono opór fizjologiczny (szparkowy) przejścia pary wodnej z liścia do otoczenia ze wzoru:

$$r_s = \frac{\rho_a \cdot c_p}{\gamma} \cdot \frac{\{e(t_w) - e_w(t_l)\}}{LE} \quad [\text{s} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (3)$$

gdzie:

W_1, W_2 - masa roślin w lizymetrze odpowiednio w czasie t_1 oraz t_2 , [g]

t_1, t_2 - czas między kolejnymi odczytami, [s]

LA - powierzchnia liści, [m²]

Q_r - radiacyjny strumień ciepła między miernikiem a listwami, [W·m⁻²]

σ - stała Stefana- Boltzmana, $\sigma=5,76 \cdot 10^{-8}$ [W·m⁻²·K⁻⁴]

ε - współczynnik emisji liścia, w analizie przyjęto $\varepsilon = 1$

T - temperatura miernika, [K]

ρ_a - gęstość powietrza, [kg·m⁻³]

c_p - ciepło właściwe powietrza, [J·kg⁻¹·K⁻¹]

γ - stała psychrometryczna, [hPa·K⁻¹]

$e(t_w)$ - ciśnienie pary wodnej w temperaturze otoczenia, [hPa]

$e_w(t_l)$ - ciśnienie pary nasyconej w temperaturze liści, [hPa]

LE - gęstość strumienia ciepła z przemiany fazowej w transpiracji, [W·m⁻²].

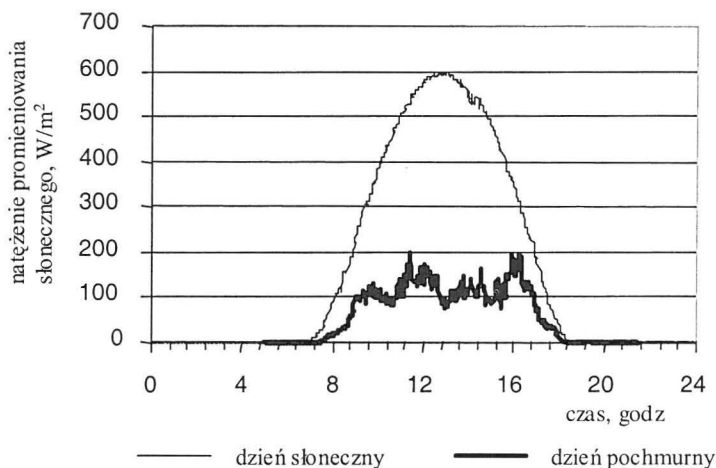
Ciśnienie pary wodnej, jego deficyt do stanu pełnego nasycenia (vpd) wyliczono korzystając ze standardowych zależności psychrometrycznych. Wyliczenia przeprowadzono dla kilku dni różniących się zakresami promieniowania słonecznego. Ilościowe miary zgodności wyliczonych i zmierzonych parametrów (opór fizjologiczny, transpiracja) w funkcji zmiennych niezależnych określono za pomocą średniego błędu kwadratowego (σ) obliczonego ze znanych z rachunku błędów zależności.

*Badania eksperymentalne przeprowadzono podczas pobytu na stypendium w IMAG, Wageningen

WYNIKI I DYSKUSJA

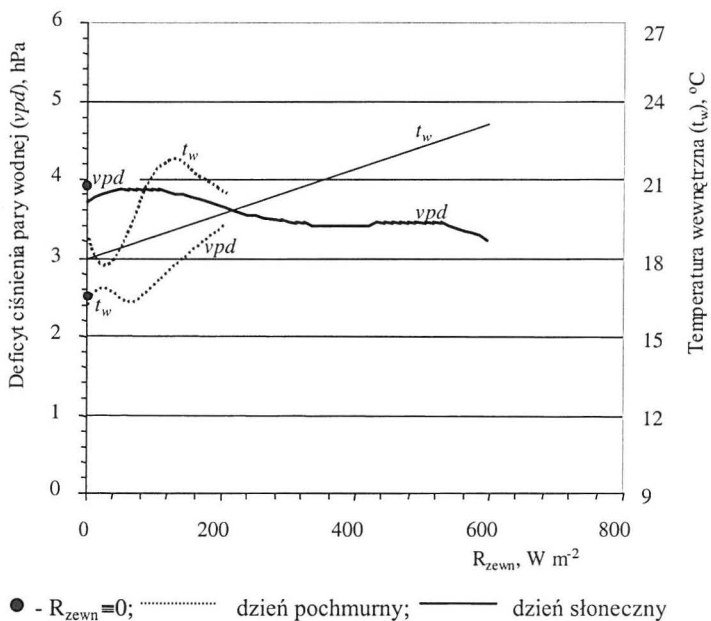
Badania zostały przeprowadzone w następującym zakresie zmiennych niezależnych: $2,23 \leq vpd \leq 5,21$ hPa, $16 \leq t_w \leq 23^\circ\text{C}$, $287 \leq \text{CO}_2 \leq 645$ ppm, $0 \leq R_{zewn} \leq 605$ W·m⁻². Obliczona powierzchnia liści analizowanych pomidorów, uprawianych w lizymetrze, wynosiła 5,57 m² oraz 6,18 m². W celu zwiększenia przejrzystości prezentowanych wyników badań do analizy, z ogólnej liczby dni eksperymentu, wyszczególniono trzy okresy: okres nocy (brak promieniowania słonecznego), dzień pochmurny oraz dzień słoneczny.

Na Rys. 1 przedstawiono dobowy przebieg promieniowania słonecznego podczas analizowanych okresów z promieniowaniem słonecznym, zaś na Rys. 2 i 3 tendencję zmian zmierzonych i obliczonych parametrów (vpd , t_w , CO_2 , t_l) w funkcji promieniowania słonecznego na zewnątrz obiektu. Można zauważyć, że deficyt ciśnienia pary wodnej wewnątrz szklarni utrzymywany był w zakresie optymalnych wartości, zaś temperatura wewnątrz obiektu oraz temperatura liści wzrastała wraz ze wzrostem natężenia promieniowania słonecznego. Z kolei, zawartość CO_2 w atmosferze w szklarni wykazywała tendencję malejącą wraz ze wzrostem natężenia promieniowania.



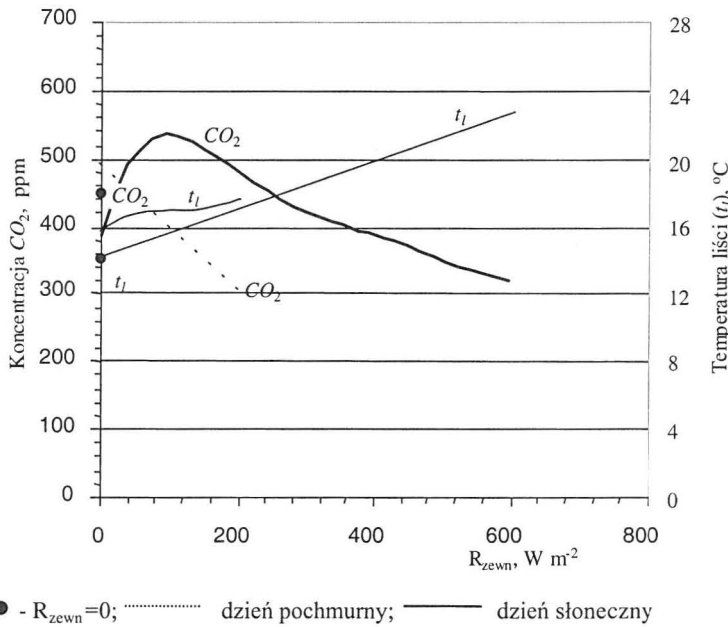
Rys. 1. Dobowy przebieg promieniowania słonecznego podczas eksperymentu.

Fig. 1. Daily change of the sunlight intensity during experiment.



Rys. 2. Tendencje zmian deficytu pary wodnej oraz temperatury wewnętrznej w funkcji promieniowania słonecznego:

Fig. 2. Trend of changes vapour pressure deficit and ambient temperature versus sunlight intensity.



Rys. 3. Tendencje zmian koncentracji CO_2 oraz temperatury liści w funkcji promieniowania słonecznego.

Fig. 3. Trend of changes CO_2 concentration and leaf temperature versus sunlight intensity.

Na Rys. 4 przedstawiono linie trendu obrazującą zmianę transpiracji pomidorów oraz oporu fizjologicznego roślin w funkcji temperatury liścia. Dla okresu, w którym występowało promieniowanie słoneczne, wraz ze wzrostem temperatury liści transpiracja wykazuje tendencję rosnącą, zaś opór fizjologiczny tendencję malejącą. Z kolei, przy zaniku promieniowania słonecznego wraz ze wzrostem temperatury liści transpiracja maleje oraz wzrasta opór fizjologiczny roślin. Wyliczone, na poziomie istotności $p=0,05$, współczynniki determinacji są statystycznie istotne. Całkowity zakres zmian transpiracji mieści się w granicach $0,008 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ($t_l=13,6^\circ\text{C}$) do $0,028 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ dla $t_l=21,9^\circ\text{C}$, zaś oporu fizjologicznego od $120 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$; $t_l=21,9^\circ\text{C}$ do $1040 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$; $t_l=13,6^\circ\text{C}$.

Zmianę transpiracji w funkcji temperatury liścia (t_l), w zależności od natężenia promieniowania słonecznego, koreluje równanie:

a) dzień słoneczny - w zakresie: $14,5 \leq t_l \leq 21,9^\circ\text{C}$, $R_{zewn,max} = 605 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
 $E_T = 0,00035 \cdot t_l^2 - 0,01 \cdot t_l + 0,091$; $R^2 = 0,94$; $\sigma = 0,0011 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

b) dzień pochmurny - w zakresie: $15,5 \leq t_l \leq 18,1^\circ\text{C}$, $R_{zewn,max} = 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$

$$E_T = 0,0029 \cdot t_l^2 - 0,094 \cdot t_l + 0,76; \quad R^2 = 0,61; \quad \sigma = 0,00023 \quad \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

c) okres zaniku promieniowania słonecznego- w zakresie: $13,6 \leq t_l \leq 15,6^\circ\text{C}$

$$E_T = 0,000395 \cdot t_l^2 - 0,013 \cdot t_l + 0,11; \quad R^2 = 0,32; \quad \sigma = 0,00014 \quad \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

Z kolei, opór fizjologiczny w zależności od intensywności promieniowania w funkcji temperatury liścia zależności przyjmują postać:

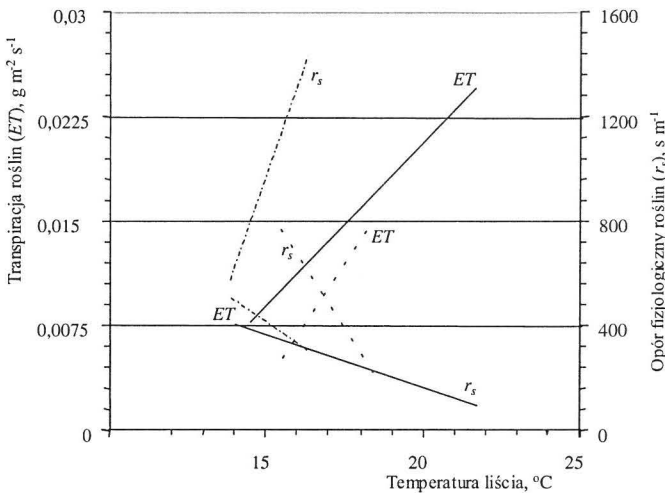
a) dzień słoneczny: $r_l = 1,97E6 \cdot t_l^{-3,24}; \quad R^2 = 0,98; \quad \sigma = 34,4 \quad \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$

b) dzień pochmurny: $r_l = 1,38E6 \cdot t_l^{-5,31}; \quad R^2 = 0,53; \quad \sigma = 206,7 \quad \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$

c) okres zaniku promieniowania słonecznego:

$$r_l = 11,33 \cdot t_l^2 - 102,3 \cdot t_l; \quad R^2 = 0,32; \quad \sigma = 256,1 \quad \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$$

Modele regresji (określone estymacją nieliniową metodą quasi-Newtona przy zachowanym współczynniku zbieżności 0,001) wybrano w oparciu o maksymalną wartość współczynnika determinacji.

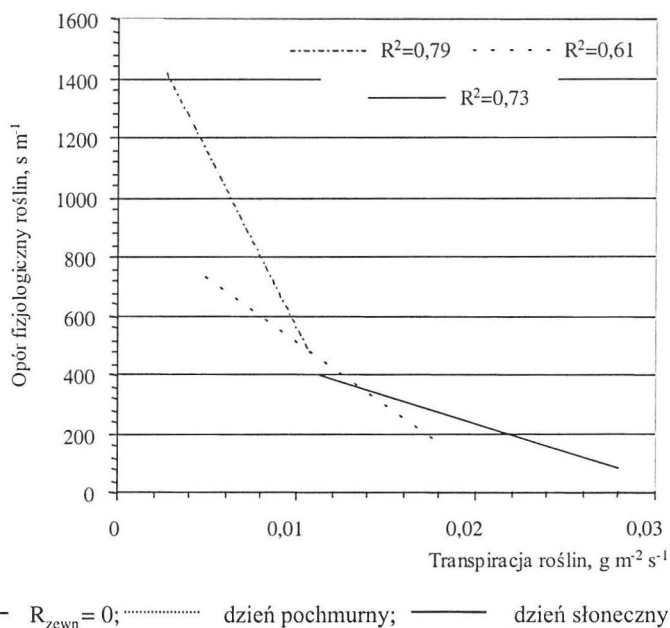


--- $R_{zewn} = 0$; dzień pochmurny; ——— dzień słoneczny

Rys. 4. Tendencje zmian transpiracji i oporu fizjologicznego roślin w funkcji temperatury liścia.

Fig. 4. Trend of changes transpiration and physiological resistance of plants versus leaves temperature.

Na Rys. 5 przedstawiono zależność oporu fizjologicznego analizowanych roślin od transpiracji. Niezależnie od wartości promieniowania słonecznego zaobserwowano, że wraz ze wzrostem transpiracji maleje opór fizjologiczny. Między tymi zmianami istnieje silna, istotnie statystyczna korelacja ($0,61 \leq R^2 \leq 0,79$).



Rys. 5. Zmiana oporu fizjologicznego roślin w funkcji transpiracji roślin.

Fig. 5. Change of physiological resistance versus plants transpiration.

Zmianę transpiracji pomidorów można wytłumaczyć wzajemną interakcją między temperaturą liścia a przebiegiem metabolizmu komórek stymulujących przemianę materii. Wzrost temperatury liścia wymusza wzrost intensywności tej przemiany, w efekcie czego wzrasta wydzielanie pary wodnej z aparatów szparkowych znajdujących się w roślinie.

Z kolei zmniejszenie oporu fizjologicznego rośliny w funkcji temperatury liścia jest konsekwencją zmian w różnicy ciśnienia pary wodnej zawartej w komórce przyszparkowej a ciśnieniem pary w powietrzu na zewnątrz liścia. Wraz ze zmianą tej wartości zmienia się również nachylenie krzywej prężności pary względem temperatury powietrza a w konsekwencji zmniejsza się również i opór przejścia pary wodnej z wnętrza liścia do otaczającej atmosfery.

Teoretycznie, zarówno transpiracja uprawianych roślin jak i opór przenoszenia strumienia pary wodnej do otaczającej rośliny atmosfery jest pochodną wzajemnych zależności: woda glebowa- metabolizm roślin- otaczająca szatę roślinną atmosfera. Transpiracja jest więc pochodną oporów: środowiska glebowego, korzeniowego, naczyniowego, liściowego oraz fizjologicznego. Na wielkość tych oporów ma

wpływ szereg czynników, z których najistotniejszy wpływ wywiera natężenie promieniowania światła w zakresie PAR, koncentracja pary wodnej w powietrzu, temperatura powietrza i podłoża, koncentracja CO₂ [18]. W warunkach rzeczywistych wobec zmiennych, w porównaniu z otwartą przestrzenią warunków panujących wewnątrz szklarni, w modelu fizycznym opisującym transpirację (traktowanej jako continuum w systemie: Gleba -Roślina- Atmosfera) oraz oporu fizjologicznego konieczne jest więc poczynienie szeregu założeń upraszczających. Jak dowiodły przedstawione wyniki badań, pomiar temperatury liści pozwala z dużym przybliżeniem szacować wielkości oporu fizjologicznego oraz transpiracji uprawianych pomidorów, a w konsekwencji również i przewidywać masę pożywki dostarczaną do systemu korzeniowego.

WNIOSKI

1. Stwierdzono, że temperatura liści pozwala szacować wielkość transpiracji roślin. Najwyższą wartość współczynnika determinacji uzyskano dla intensywnego promieniowania słonecznego.
2. Podczas pogody radiacyjnej, wraz ze wzrostem temperatury liści maleje opór fizjologiczny przenoszenia pary wodnej z liści do otaczającej atmosfery, zaś przy zaniku promieniowania słonecznego opór wzrasta.
3. Niezależnie od wartości promieniowania słonecznego zaobserwowano, że wraz ze wzrostem transpiracji maleje opór fizjologiczny.

PIŚMIENNICTWO

1. **Anderson M.C., Norman J.M., Meyers T.P., Diak G.R.:** An analytical model for estimating canopy transpiration and carbon assimilation fluxes based on canopy light-use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101(4), 265-289, 2000.
2. **Baldocchi D., Meyers T.:** On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapour and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90 (1-2), 1-25, 1998.
3. **Baranowski P.:** Porównanie i weryfikacja modeli ewapotranspiracji rzeczywistej i potencjalnej z zastosowaniem pomiaru temperatury radiacyjnej roślin. *Acta Agrophysica*, 22, 7-15, 1999.
4. **Baranowski P., Mazurek W., Walczak R.T.:** The relation of actual to potential evapotranspiration as an indicator of plant water stress for meadow plant cover. *Acta Agrophysica*, 53, 17-28, 2001.
5. **Chehbouni A., Nouvellon Y., Lhomme J-P., Watts C., Boulet G., Kerr Y.H., Moran M.S., Goodrich D.C.:** Estimation of surface sensible heat flux using dual angle observations of radiative surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(1), 55-65, 2001.

6. **Dauzat J., Rapidel B., Berger A.:** Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(2), 143-160, 2001.
7. **Hanan N.P., Prince S.D.:** Stomatal conductance of west-central supersite vegetation in HAPEX-Sahel: measurements and empirical models. *Journal of Hydrology*, 188-189 (1-4), 536-562, 1997.
8. **Jones H.G.:** Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95(3), 139-149, 1999.
9. **Katsoulas N., Baille A., Kittas C.:** Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106 (3), 233-247, 2001.
10. **Kurpaska S.:** Porównanie modeli opisujących transpirację pomidorów uprawianych w szklarni. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 461, 255-265, 1998.
11. **Lhomme J.P., Monteny B.:** Theoretical relationship between stomatal resistance and surface temperatures in sparse vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104(2), 119-131, 2000.
12. **Lhomme J.P., Rocheteau A., Ourcival J.M., Rambal S.:** Non-steady-state modelling of water transfer in a Mediterranean evergreen canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108 (1), 67-83, 2001.
13. **Mazurek W.:** Zastosowanie pomiaru temperatury radiacyjnej w modelowych badaniach stresu wodnego roślin. *Acta Agrophysica*, 22, 151-156, 1999.
14. **Mo X., Liu S.:** Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(3), 203-222, 2001.
15. **Montero J.I., Anton A., Munoz P., Lorenzo P.:** Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidity in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107(4), 323-332, 2001.
16. **Moran M.S., Rahman A.F., Washburne J.C., Goodrich D.C., Weltz M.A., Kustas W.P.:** Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80(2-4), 87-109, 1996.
17. **Olioso A., Carlson T.N., Brisson N.:** Simulation of diurnal transpiration and photosynthesis of a water stressed soybean crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81 (1-2), 41-59, 1996.
18. **Stanghellini C.:** Transpiration of greenhouse crops and aid to climate management. Ph. Dissertation, IMAG, Wageningen, The Netherlands, 1987.
19. **Tourula T., Heikinheimo M.:** Modelling evapotranspiration from a barley field over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91 (3-4), 237-250, 1998.
20. **Wang Y-P., Leuning R.:** A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy. I: Model description and comparison with multi-layered model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91 (1-2), 89-111, 1998.
21. **Zhan X., Kustas W.P.:** A coupled model of land surface CO₂ and energy fluxes using remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107 (2), 131-152, 2001.

TEMPERATURE OF LEAVES AS TRANSPIRATION CRITERION OF GREENHOUSE TOMATOES

S. Kurpaska

Department of Agricultural Engineering, University of Agriculture, ul. Balicka 104, 30-149 Kraków
e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl

Abstract. The attempt has been undertaken in the paper to describe plant transpiration in relationship to leaves temperature. There was analysed as well mutual correlation between resistance of water vapour transfer from leaves to surrounding atmosphere and their temperature. The experimental work was carried out in the greenhouse where tomatoes were planted. Obtained results were presented in graphic form and correlations were found which described changes of transpiration and physiological resistance depending on temperature of leaves. Vital relationships were observed between transpiration of plants as well as physiological resistance value and temperature of leaves. Additionally it was proved that using minimum quantity of parameters of surrounding environment and cultivated plants, which are described by standard measuring instruments, one could approximately estimate required mass of nutrient for their root system.

Key words: leaves temperature, transpiration, *physiological resistance*, tomatoes.