

WYKORZYSTANIE PRAW KONWEKCJI DO SZACOWANIA 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 artykule przeanalizowano transpirację roślin uprawianych w szklarniach w oparciu o prawa opisujące konwekcję naturalną z wykorzystaniem liczb podobieństwa. Badania eksperymentalne przeprowadzono w szklarni, w której transpirację pomidorów szklarniowych mierzono wykorzystując metodę lizymetryczną. Stwierdzono, że standardowe równania korelacyjne opisują nieprawidłowo proces transpiracji. Dlatego znaleziono inne równanie korelacyjne (zależności między liczbami: Sherwooda, Archimedes, Schmidta). Dokonano porównania między transpiracją zmierzoną a obliczoną w oparciu o to równanie. Graficznie przedstawiono zależności między współczynnikiem wnikania masy a wartościami parametrów mikroklimatu wewnątrz szklarni. Stwierdzono, że do opisu procesu transpiracji wystarcza znajomość ich podstawowych wartości (wilgotność i temperatura otoczenia oraz temperatura liści).

Słowa kluczowe: konwekcja, transpiracja, pomidory.

WSTĘP

W procesie przechodzenia, poprzez metabolizm komórek uprawianych roślin, wody z fazy ciekłej w gazową ciekawym, z punktu widzenia poznawczego, jest zagadnienie możliwości wykorzystania praw konwekcji opisujących proces wymiany masy (wody w postaci pary wodnej) między uprawianymi roślinami a otaczającą atmosferą. Teoretycznie, wymiana masy między organizmami a otaczającym je powietrzem odbywa się na drodze dwóch rodzajów dyfuzji: cząsteczkowej (wewnątrz organizmu- np. aparaty szparkowe w liściach) i turbulencyjnej (w cienkiej warstwie powietrza które otacza ten organizm). Z kolei, w powietrzu proces wymiany masy dokonuje się głównie za pośrednictwem dyfuzji turbulentnej, choć nieustannie

odbywa się również i dyfuzja cząsteczkowa, która w wyniku zmiany stanu skupienia powoduje przekształcenie strumienia dyfundowanej masy w strumień ciepła. Strumień pary wodnej musi pokonać opór przejścia w wnętrza komory aparatu szparkowego do otoczenia. Siłą napędową tego procesu jest różnica w ciśnieniu pary wodnej we wnętrzu komory i na zewnątrz liścia. Stąd intensywność wydzielania strumienia pary wodnej rośnie pod wpływem różnic w ciśnieniu pary wodnej. Po pokonaniu oporu aerodynamicznego powietrza (siłą wymuszającą jest gradient ciśnienia pary między powierzchnią liścia a otoczeniem) strumień pary miesza się z otaczającym powietrzem. Z przedstawionego mechanizmu wynika, że strumień masy pary wodnej wydzielanej przez metabolizm komórek do otaczającego powietrza, wywołuje powstawanie niejednorodności pola temperatury w środowisku otaczającym rośliny. Z kolei, pojawiająca się niejednorodność temperatury wywołuje przepływ ciepła. Stąd, wymiana masy między ciałami a opływającym je powietrzem jest zjawiskiem analogicznym do konwekcyjnej wymiany ciepła. W konsekwencji można przypuszczać, że intensywność wymiany masy może być opisana przy użyciu metod opisujących konwekcyjną wymianę ciepła. Zagadnienie określania intensywności wzajemnie współzależnych procesów wymiany ciepła i masy były przedmiotem rozważań, w których autorzy szacowali jeden ze strumieni w oparciu o wartość drugiego z wykorzystaniem zależności między liczbami podobieństwa (kryterialnymi) z uwzględnieniem m.in. równań korelacyjnych uwzględniających różne typy powierzchni, szorstkość liści, rodzaj konwekcji (swobodna lub wymuszona) czy też uwzględniając heterogeniczny rozkład liścia na roślinie. I tak, Jacobs i Verhoef [4] w analizie procesu parowania wody z wierzchniej warstwy gleby wykorzystali zależności między liczbami podobieństwa. Do opisu transferu ciepła wykorzystane zostały liczby Rayleigha i Nusselta, zaś do ruchu masy liczby Rayleigha i Sherwooda. Otrzymane wyniki porównano z rezultatami lizymetrycznych badań doświadczalnych uzyskując zadawalającą zgodność. Z kolei Daudet i in. [1] opracowali, wprowadzając do opisu zależności między liczbami kryterialnymi, i przetestowali w tunelu aerodynamicznym metodę określania przewodności liścia. Jako wymiar charakterystyczny przyjęli parametr długości liścia. W wyniku analizy stwierdzono, że najlepsze wyniki uzyskane zostały gdy wykorzystali równania kryterialne dla powierzchni płaskich. McInnes i in. [6] badali wpływ kierunku i prędkości wiatru na intensywność wymiany ciepła i pary wodnej między wierzchnią warstwą gleby a otaczającym powietrzem. Przepływ ciepła i masy określili z równań bilansowych. Uzyskane wyniki strumienia masy porównali z wartościami zmierzonymi wykorzystując skonstruowaną specjalistyczną aparaturę badawczą. Zaobserwowano, że aerodynamiczna przewodność analizowanych strumieni zależy

od wartości przyjętych do analizy zmiennych niezależnych. Molder i Linddrott [7] do analizy zagadnień cieplnych między liściem a otaczającym powietrzem wprowadzili współczynnik jego szorstkości. Współczynnik ten uzależnili od heterogenicznego rozkładu liści na roślinie. W analizie wykorzystali liczby kryterialne (liczbę Reynolds'a i Stanton'a). Domingo i in. [2] badali przewodność listowia dla roślin w warunkach suchego klimatu. Eksperymentalnie określali zależność między prędkością wiatru a przewodnictwem, a otrzymane wyniki porównali z wartościami obliczonymi z równań korelacyjnych dla warunków konwekcji wymuszonej i swobodnej. Stwierdzono, że wykładniki potęgowe dla konwekcji wymuszonej przyjmują zróżnicowane wartości zależne od roślin. Smith i in. [8] przedstawili metodę oraz wyniki pomiarów przewodności aerodynamicznej transferu masy z liścia do otoczenia. Stwierdzono, że przewodność zależy od zakresu prędkości wiatru. W znalezionym równaniu korelacyjnym wykładniki potęgowe (przy członie prędkości) uzależnili od rodzaju przepływu (przepływ laminarny i turbulentny). W konkluzji stwierdzono, że opracowana metoda i znalezione równanie mogą być przydatne do szacowania procesu transpiracji dla roślin nie tworzących zwartego listowia.

Z przedstawionego przeglądu literatury wynika, że cytowani badacze do opisu procesu transpiracji wykorzystywali różne zależności między liczbami kryterialnymi, traktowali proces wydzielania pary wodnej jako konwekcję naturalną lub wymuszoną. Celowe jest zatem przeanalizowanie możliwości zastosowania praw konwekcji do oszacowania intensywności wymiany masy w procesie transpiracji. Będzie to głównym celem pracy.

MATERIAŁ I METODA

Badania eksperymentalne przeprowadzono w szklarni w której uprawiano pomidory. Transpirację pomidorów określano metodą lizymetryczną, monitorując w sposób ciągły (w odstępach dwuminutowym) masę czterech roślin rosnących w lizymetrze. Dodatkowo podczas eksperymentu mierzono parametry fizyczne otaczającego powietrza (zawartość pary wodnej, temperatura, intensywność promieniowania) oraz mierzono powierzchnię liści roślin. Dysponując zmierzonymi i wyliczonymi wartościami parametrów mikroklimatu i roślin (temperatura i wilgotność powietrza wewnątrz szklarni, temperatura oraz powierzchnia liści, transpiracja roślin) przeprowadzona została szczegółowa analiza uwzględniająca proporcjonalną zależność między strumieniem masy pary wodnej wydzielanej przez aparaty szparkowe roślin a iloczynem współczynnika dyfuzji oraz gradientu stężenia pary.

Intensywność strumienia masy w analizowanym układzie została przeanalizowana w oparciu o metody stosowane w teorii podobieństwa [9]. Zastosowana metoda polega na wyodrębnieniu, (w oparciu o równania ciągłości, ruchu oraz wymiany masy na powierzchni) tzw. liczb podobieństwa które ujmują związki między: intensywnością wnikania masy a wymiarem charakterystycznym i współczynnikiem dyfuzji w odniesieniu do gradientu stężenia (liczba Sherwooda); współczynnikiem dyfuzji a lepkością kinematyczną gazu (liczba Schmidta); przyśpieszeniem ziemskim a wymiarem charakterystycznym powierzchni wymieniającej masę, koncentracją pary wodnej w otoczeniu i na powierzchni (liczba Archimedesesa); oraz przyśpieszeniem ziemskim a wymiarem charakterystycznym powierzchni wymieniającej masę, termicznym współczynnikiem rozszerzalności objętościowej, różnicą temperatury między otoczeniem a powierzchnią i lepkością kinematyczną (liczba Grashofa). Zastosowano następującą procedurę wyliczeń: Strumień pary wodnej wydzielany w procesie transpiracji opisany został zależnością:

$$TR = \frac{k_m}{R \cdot T} (p_1 - p_{ot}) \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

Współczynnik wnikania masy (k_m) wyliczony został z liczby Sherwooda w postaci:

$$Sh = \frac{k_m \cdot L}{D_c} \quad [-] \quad (2)$$

W pierwszym etapie przeprowadzonej analizy zbadano, czy transpiracja wyliczona ze standardowych równań korelacyjnych, stosowanych w inżynierii chemicznej do szacowania intensywności wymiany masy a ujmujących wykładniczy związek między liczbami podobieństwa, jest skorelowana ze zmierzoną transpiracją. Wartość transpiracji wyliczono z następujących zależności [3]:

$$Sh = 2 + 0,5 \cdot (Sc \cdot Gr)^{0,5} \quad (3)$$

oraz

$$Sh = 0,66 \cdot (Sc \cdot Ar)^{0,26} \quad (4)$$

Oznaczenia:

k_m - współczynnik wnikania masy, [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

R - stała gazowa pary wodnej, [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

T - średnia temperatura ośrodków wymiany masy (temperatura liścia i otoczenia), [K]

L - wymiar charakterystyczny liścia, [m]

D_c - współczynnik dyfuzji, [$m^2 \cdot s^{-1}$]

$Sc = \frac{\nu}{D_c}$ - liczba Schmidta, [-]

ν - lepkość kinematyczna powietrza, [$m^2 \cdot s^{-1}$]

$Gr = \frac{g \cdot L^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2}$ - liczba Grashofa [-]

g - przyśpieszenie ziemskie, [$m \cdot s^{-2}$]

p_1, p_{ot} - ciśnienie cząstkowe pary wodnej na powierzchni liścia (p_1) i w otaczającym powietrzu (p_{ot}), [Pa]

β - współczynnik termicznej rozszerzalności powietrza, [K^{-1}]

ΔT - różnica temperatury między powierzchnią liścia a otoczeniem, [K]

$Ar = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \frac{\rho_1 - \rho_{ot}}{c_1}$ - liczba Archimedesesa [-]

ρ_1, ρ_2 - gęstość powietrza, odpowiednio: na powierzchni liścia (ρ_1) i otoczenia (ρ_2), [$kg \cdot m^{-3}$]

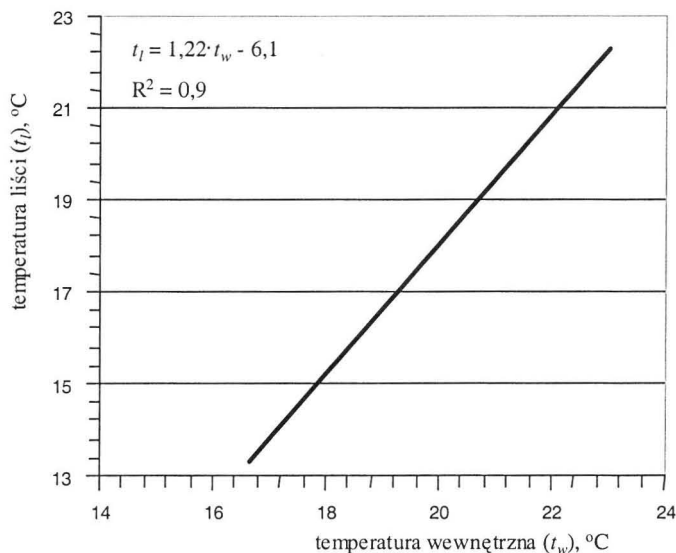
c_1 - koncentracja pary wodnej na powierzchni liścia, [$kg \cdot m^{-3}$]

Po znalezieniu współczynnika determinacji (R^2) wyprowadzono równanie korelacyjne. Prezentowany w wynikach rodzaj równania określono w oparciu o największą wartość współczynnika (R^2). Równanie to znaleziono stosując estymację nieliniową metodą quasi-Newtona przy zachowanym współczynniku zbieżności 0,001. W obliczeniach przyjęto, że powietrze stykające się z powierzchnią liścia jest w stanie pełnego nasycenia. Metoda pomiaru temperatury liścia, określania ich powierzchni została szczegółowo opisana w pracy [5]. W obliczeniach, jako wymiar charakterystyczny powierzchni wymiany masy (L) przyjęto totalną długość liścia (traktowaną jako sumaryczną długość wszystkich liści). Wymiar (L) wynika z procedury stosowanej w teorii podobieństwa, w myśl której zależności między podstawowymi wielkościami opisującymi analizowane zjawisko ujęte są w tzw. modułach (liczbach) podobieństwa. W obliczeniach psychrometrycznych przyjęto ciśnienie równe normalnemu ciśnieniu otoczenia. Do oceny porównania wartości zmierzonych i obliczonych wykorzystano standardowe miary podobieństwa między wartościami zmierzonymi i wyliczonymi w postaci: maksymalnego lokalnego błędu względnego ($e_{lok.}$), całkowitego błędu względnego ($e_{tot.}$), współczynnika determinacji (R^2) oraz średniego błędu kwadratowego (σ). Błędy względne określone zostały względem wartości zmierzonych.

WYNIKI I DYSKUSJA

Badania przeprowadzono w dla następujących warunków: $1,18 \leq vpd \leq 4,08$ hPa, $16,6 \leq t_w \leq 22,7^\circ\text{C}$, $317 \leq \text{CO}_2 \leq 578$ ppm, $0 \leq R_{zewn} \leq 578$ W·m⁻², całkowita długość liścia podczas eksperymentu wynosiła ok. 0,8 m.

Na Rys. 1. przedstawiono zmianę temperatury liści w funkcji temperatury wewnątrz szklarni. Temperatura liści wzrasta liniowo wraz ze wzrostem temperatury otoczenia, i w badanych warunkach zmieniała się od 13,3°C (dla temperatury wewnętrznej równej 16,6°C) do 21,8°C (temperatura wewnątrz 22,7°C).

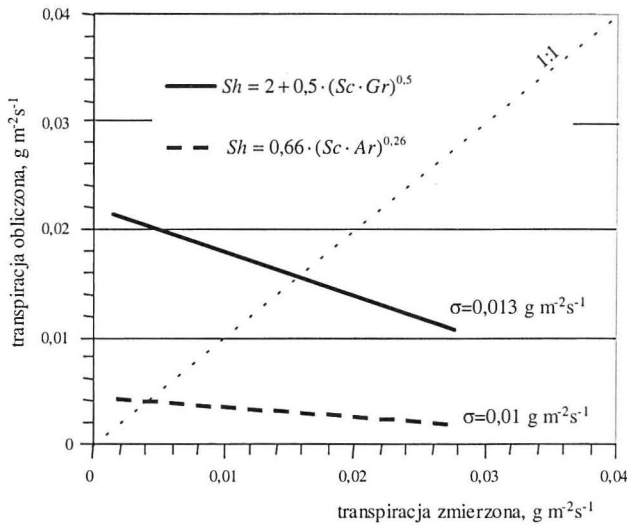


Rys. 1. Temperatura liścia w relacji do temperatury otoczenia.

Fig. 1. Leaf temperature as a relation of the ambient temperature.

Na Rys. 2 przedstawiono porównanie między transpiracją obliczoną (z prezentowanych równań korelacyjnych) a transpiracją zmierzoną. Można zauważyć, że przedstawione równania nie opisują poprawnie przebiegu transpiracji, gdyż średni błąd kwadratowy zmienia się od 0,01 g·m⁻²·s⁻¹ (transpiracja obliczona z równania korelacyjnego uwzględniającego liczbę Schmidta i Grashofa) do 0,013 g·m⁻²·s⁻¹ (transpiracja obliczona z równania ujmującego związek między liczbą Schmidta i Archimedesesa). Różnice między wartościami uzyskanymi z rozwiązania równań korelacyjnych i zmierzonymi wynikają zapewne z faktu, iż w warunkach rzeczywistych powierzchnia liścia nie jest idealnie gładka (występuje chropowatość liścia) jak również występują konwekcyjne ruchy powietrza, spowodowane różnicą tempe-

ratury między powierzchnia liścia a otoczeniem, co w konsekwencji wymusza zmiany położenia liści wewnątrz szklarni. Dodatkowo, w badaniach modelowych wyprowadzone równania korelacyjne nie uwzględniały wpływ niektórych czynników, np. kąta nachylenia liścia oraz jego przestrzennej orientacji. Ponieważ porównanie między zmierzoną i obliczoną transpiracją cechuje niewielka zgodność, transpirację obliczono zgodnie z podanymi zależnościami (równanie 1 i 2) uzupełnione wyliczeniami wartości, z zależności psychrometrycznych, parametrów mikroklimatu.



Rys. 2. Porównanie między zmierzoną i obliczoną ze standardowych równań korelacyjnych transpiracją.

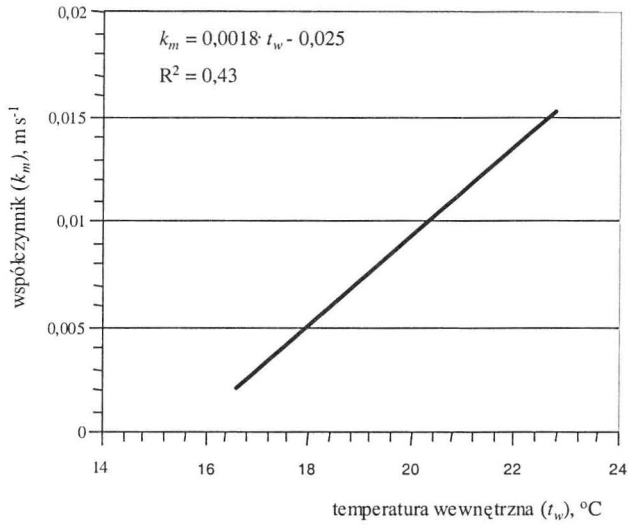
Fig. 2. Comparison of measured and calculated from standard equations for transpiration.

Analizowano obydwie zależności (tzn. zależność między liczbami Schmidta i Grashofa oraz między liczbami Schmidta i Archimedes). W oparciu o wartość współczynnika determinacji końcowe równanie korelacyjne przybiera postać:

$$Sh = 32326,8 \cdot (Sc \cdot Ar)^{-0,104} - 2758,3 \quad R^2 = 0,89$$

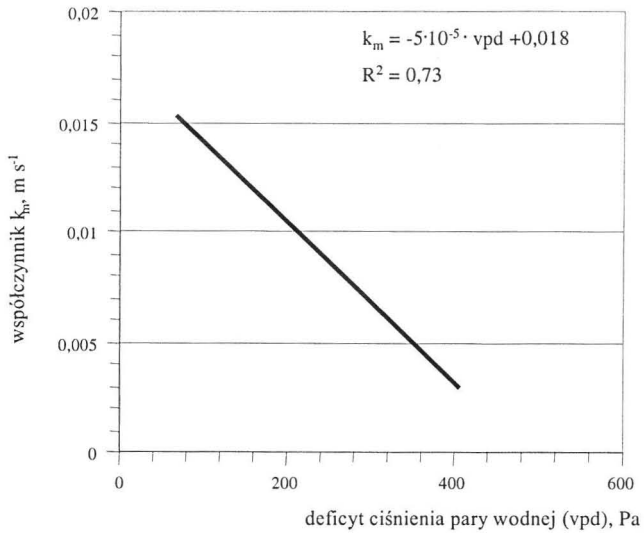
$$\text{w zakresie: } 3,89 \cdot 10^9 \leq Sc \cdot Ar \leq 17,9 \cdot 10^9$$

Na kolejnych wykresach (Rys. 3-5) przedstawiono wyliczony współczynnik wnikania masy w funkcji temperatury wewnątrz szklarni (Rys. 3), deficytu ciśnienia pary wodnej (Rys. 4) oraz temperatury liści (Rys. 5). Jak można zauważyć, wartość



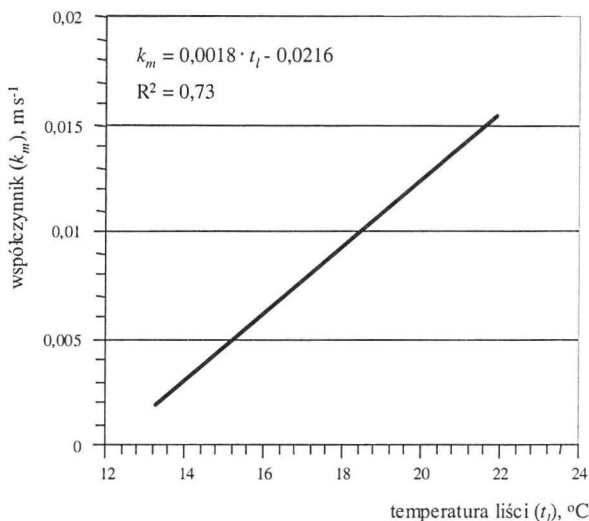
Rys. 3. Współczynnik wnikania masy w funkcji temperatury wewnętrznej.

Fig. 3. Mass transfer coefficient versus ambient temperature.



Rys. 4. Współczynnik wnikania masy w funkcji deficytu ciśnienia pary wodnej w powietrzu wewnątrz szklarni

Fig. 4. Mass transfer coefficient versus vapour pressure deficit in the ambient air.



Rys. 5. Współczynnik wnikania masy w funkcji temperatury liści.

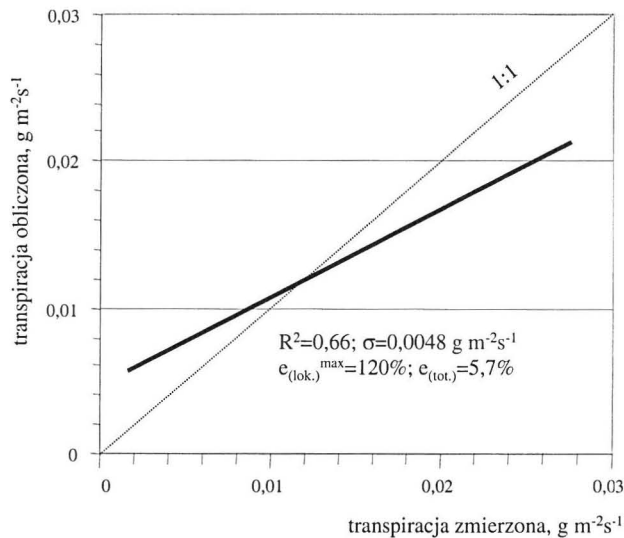
Fig. 5. Mass transfer coefficient versus leaves temperature.

współczynnika w istotny sposób zależy od tych zmiennych niezależnych. Im wyższa temperatura wewnętrzna, tym wartość współczynnika wzrasta z $0,003 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($t_w = 16,6^{\circ}\text{C}$) do ok. $0,015 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($t_w = 22,7^{\circ}\text{C}$). Wraz ze wzrostem deficytu pary wodnej wewnątrz szklarni (Rys. 4), wartość współczynnika maleje. Wartość współczynnika wnikania wzrasta wraz ze wzrostem temperatury liści.

Przebieg zaobserwowanych zależności można wytłumaczyć wzajemną interakcją między procesem transpiracji a deficytem ciśnienia pary wodnej, temperaturą liści oraz ustawieniem powierzchni liścia względem działania promieni słonecznych. W badanych warunkach z racji osłonowego charakteru szklarni, występuje konwekcja swobodna. W tym rodzaju konwekcji, pojawiający się przepływ powietrza wokół liści, wywołany jest różnicą gęstości powietrza. Ruch powietrza wokół liści wywołana jest więc zarówno gradientem temperatury jak i stężenia pary wodnej. Dodatkowo, dyfuzja cząsteczkowa pary w warstwie laminarnej zależy nie tylko od oporu aerodynamicznego ale i od intensywności cząsteczkowej dyfuzji ciepła i pędu.

Na Rys. 6 przedstawiono porównanie między obliczoną i zmierzoną transpiracją badanych pomidorów szklarniowych w całym zakresie zmian warunków doświadczenia. Można zauważyć, że porównanie to jest zadawalające, gdyż całkowity błąd oszacowania transpiracji nie przekracza 6%, zaś średni błąd kwadratowy (σ) wynosi

0,0048 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}$. Można zatem stwierdzić, że transpirację badanych pomidorów można opisać standardowymi prawami stosowanymi w analizie systemów technicznych w których zachodzi wymiana masy. Stąd do oszacowania intensywności procesu transpiracji wystarcza znajomość standardowych parametrów mikroklimatu w szklarni, czyli temperatury i wilgotności otoczenia oraz temperatur liści.



Rys. 6. Porównanie między obliczoną i zmierzoną transpiracją

Fig. 6. Comparison of measured and calculated transpiration.

WNIOSKI

1. Do opisu transpiracji pomidorów można wykorzystać prawa konwekcji.

Równanie korelacyjne opisujące wymianę masy przyjmuje postać:

$$Sh = 32326,8 \cdot (Sc \cdot Ar)^{-0,104} - 2758,3 \quad R^2 = 0,89$$

$$\text{w zakresie: } 3,89 \cdot 10^9 \leq Sc \cdot Ar \leq 17,9 \cdot 10^9$$

2. W badanych wartościach parametrów mikroklimatu wewnątrz szklarni ($1,18 \leq vpd \leq 4,08$ hPa, $16,6 \leq t_w \leq 22,7^\circ\text{C}$, $317 \leq \text{CO}_2 \leq 578$ ppm, $0 \leq R_{zewn} \leq 578$ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, $13,3 \leq t_{liścia} \leq 21,8^\circ\text{C}$) wartość współczynnika wnikania masy zmienia się od 0,003 do 0,015 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.
3. Wraz ze wzrostem temperatury wewnętrznej, temperatury liści wartość współczynnika wnikania masy wzrasta, zaś przy wzroście deficytu ciśnienia pary wodnej w powietrzu współczynnik maleje.

PIŚMIENNICTWO

1. **Daudet F.A., Silvestre J., Ferreira M.I., Valacogne C., Pradelle F.:** Leaf boundary layer conductance in vineyard in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89(3-4), 255-267, 1998.
2. **Domingo F., Gardingen van P.R., Brenner A.J.:** Leaf boundary layer conductance of two native species in southeast Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81 (3-4), 179-199, 1996.
3. **Hobler T.:** Dyfuzyjny ruch masy i absorber. WNT, Warszawa, 1976.
4. **Jacobs A., Verhoef A.:** Soil evaporation from sparse natural vegetation estimated from Sherwood numbers. *Journal of Hydrology*, 188-189 (1-4), 443-452, 1997.
5. **Kurpaska S.:** Wpływ niektórych czynników środowiskowych na ewapotranspirację pomidorów szklarniowych uprawianych w warstwie mineralnej. *Zesz. Probl. Post. Nauk Roln.*, 444, 203-210, 1996.
6. **McInnes K.J., Heilman J.L., Lascano R.J.:** Aerodynamic conductances at the soil surface in a vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81 (1-2), 78-89, 1996.
7. **Molder M., Lindroth A.:** Dependence of kB^{-1} factor on roughness Reynolds number for barley and pasture *Agricultural and Forest Meteorology*, 106(2), 147-152, 2001.
8. **Smith D.M., Jarvis P.G., Odongo J.C.:** Aerodynamic conductances of trees in windbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86 (1-2), 17-31, 1997.
9. **Staniszewski B.:** Wymiana ciepła. PWN, Warszawa, 1980.

UTILISATION OF LAWS OF CONVECTION FOR ESTIMATION
OF GREENHOUSE TOMATOES TRANSPIRATION

S. Kurpaska

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

Abstract. Transpiration of plants cultivated in greenhouses was analysed in the paper on the bases of laws, which describe natural convection utilising similarity numbers. Experimental works were carried out in greenhouse. Transpiration of growing in there tomatoes one measured utilising lisimetric method. It was found that standard correlation equations described incorrectly transpiration process. That is why other correlation equation was found (relationship among: Sherwood's, Archimedes's, Schmidt's numbers). Comparison was done between measured transpiration and calculated value of it on the base of above mentioned equation. In graphic way has been shown relation between mass penetration coefficient and measured values of microclimate parameters inside of greenhouse. It was found that to describe transpiration process there is enough to know the basic values of microclimate (humidity and environment temperature as well as leaves one).

Key words: convection, transpiration, tomatoes.