



MODEL PROCESU WYMIANY CIEPŁA I MASY W POWIETRZU WEWNĄTRZ SZKLARNI

Anna Raczek, Ewa Wachowicz*

Zakład Automatyki, Politechnika Koszalińska

* Adres do korespondencji: ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin, e-mail: ewa.wachowicz@tu.koszalin.pl

INFORMACJE O ARTYKULE

Historia artykułu:
Wpłynął: listopad 2013
Zrecenzowany: styczeń 2014
Zaakceptowany: luty 2014

Słowa kluczowe:
szklarnia
mikroklimat
model matematyczny
wymiana ciepła i masy

STRESZCZENIE

Celem pracy było opracowanie matematycznego modelu wymiany ciepła i masy w powietrzu wewnątrz wielkogabarytowej szklarni, w której prowadzona jest towarowa uprawa roślin. Podczas formułowania modelu wykorzystano m.in. modele opisane w literaturze i wyniki badań eksperymentalnych. Opracowany model matematyczny został zaimplementowany do programu MATLAB/Simulink, a symulacje przeprowadzone z udziałem modelu komputerowego wykorzystano do przeprowadzenia graficznej i statystycznej walidacji modelu. Analiza wyników symulacji pozwala na stwierdzenie logicznej poprawności opracowanego modelu, a także umożliwia określenie punktów krytycznych niedopasowania modelu. Na dokładność opracowanego modelu wymiany ciepła wpływa przede wszystkim stopień jego uproszczenia. Aby opracowany model mógł być wykorzystany, np. do celów sterowniczych, wymaga większego uszczegółowienia.

Wprowadzenie

Zainteresowanie modelowaniem klimatu szklarni sięga początków towarowej uprawy roślin pod osłonami. Modele klimatu szklarni stanowią główne narzędzie kontroli parametrów termiczno-wilgotnościowych wewnątrz szklarni. Ich znajomość wspomaga podejmowanie decyzji dotyczących prowadzenia uprawy, a także umożliwia zastosowanie nowoczesnych, złożonych algorytmów sterowania mikroklimatem. W literaturze znajdziemy wiele modeli klimatu szklarni, są to zarówno statyczne i dynamiczne modele matematyczne, jak i modele „czarnej skrzynki” bazujące na metodach sztucznej inteligencji. Przegląd tych modeli znajdziemy w pracach (Boaventura Cunha, 2003; Raczek, 2012). Jednymi z najważniejszych w tym zakresie są prace Bot'a (1983) i Jong'a (1990). Modele klimatu szklarni są najczęściej tworzone dla obiektów doświadczalnych, wyposażonych w wiele dodatkowych czujników pomiarowych. Często modele te są celowo upraszczane. W opisie pomijane są pewne procesy, w celu zbadania interesującego badacza zjawiska (np. badania dotyczące wentylacji przeprowadzane są w obiekcie pozbawionym roślin). Modele klimatu szklarni są formułowane i walidowane z uwzględnieniem: danego gatunku i fazy rozwojo-

wej uprawianych roślin, rejonu uprawy i panujących w nim warunków pogodowych, struktury i typu szklarni, a także pracy urządzeń wentylacji. Dlatego też nie jest łatwo bezpośrednio ekstrapolować modele do inaczej zbudowanych, zlokalizowanych w innym miejscu szklarni.

Obiektem badań w niniejszej pracy była nowoczesna szklarnia typu Venlo zlokalizowana w Różankach w województwie lubuskim, w której na powierzchni 5,9 ha prowadzona była rynnowa uprawa pomidorów. Dla tej szklarni opracowano prezentowany poniżej matematyczny model procesów wymiany ciepła i masy w powietrzu wewnętrznym. W szklarni na przełomie marca i kwietnia 2011r. komputer klimatyczny rejestrował co 15 min wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, które w modelu są sygnałami wyjściowymi, oraz sygnały sterujące (wejściowe w modelu) w postaci temperatury rur grzewczych i stopnia otwarcia wietrzników. Zakłóceniami były tu parametry otoczenia szklarni: temperatura i wilgotność powietrza zewnętrznego, radiacja i prędkość wiatru. Dane o warunkach pogodowych rejestrowane były przez stację meteorologiczną.

Celem pracy było opracowanie dynamicznego, matematycznego modelu wymiany ciepła i masy w powietrzu wewnątrz wielkogabarytowej szklarni, w której prowadzona jest towarowa uprawa roślin, gdy do dyspozycji mamy dane o parametrach klimatu standardowo zbierane przez komputer klimatyczny i stację meteorologiczną.

Zakres pracy związanej modelowaniem klimatu szklarni obejmował:

- dostosowanie modeli literaturowych do badanego obiektu, poprzez uwzględnienie wielkości charakterystycznych badanej szklarni i jej wyposażenia technicznego,
- opracowanie modelu komputerowego i przeprowadzenie symulacji,
- graficzną i statystyczną walidację otrzymanego modelu procesu wymiany ciepła i masy w powietrzu wewnątrz szklarni z wykorzystaniem wyników badań eksperymentalnych.

Model matematyczny mikroklimatu w szklarni

Mikroklimat w szklarni jest wynikiem kombinacji złożonych mechanizmów obejmujących procesy wymiany ciepła i masy występujące w szklarni, a także procesy zachodzące między wnętrzem szklarni a jej otoczeniem. Procesy zachodzące w szklarni to procesy silnie nieliniowe, powiązane ze sobą. Podczas formułowania matematycznego modelu tych procesów, należy ułożyć równania bilansów ciepła i masy dla powietrza wewnątrz szklarni. (Wachowicz, 2006).

Przystępując do opracowywania modelu, dokonano następujących założeń upraszczających:

- szklarnia jest traktowana jak doskonale wymieszany zbiornik, tzn. że analizowane parametry powietrza mają taką samą wartość w całej objętości szklarni,
- ze względu na brak danych empirycznych, nie uwzględniono wpływu ekranów energetycznych,
- pominięto wpływ podłoża na wymianę ciepła i masy, ponieważ w badanym obiekcie uprawa prowadzona była na pokrytych białą folią matach z włókna kokosowego,
- pominięto odparowanie kondensatu z osłony szklarni i roślin, ponieważ w nowoczesnych szklarniach następuje odprowadzanie kondensatu z osłony, a w czasie prawidłowo prowadzonej uprawy roszenie na roślinach nie powinno się pojawiać.

Model wymiany ciepła

Biorąc pod uwagę wyposażenie badanego obiektu, zmiany w czasie temperatury powietrza w szklarni można przedstawić w postaci równania bilansu ciepła:

$$\frac{dT_{wew}}{d\tau} = \frac{1}{\rho_{wew} c_{wew} V_{sz}} (Q_{osłona} + Q_{s.grzewczy} + Q_{radiacja} - Q_{went} - Q_{transp} + Q_{kond}) \quad (\text{K}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (1)$$

gdzie:

- T_{wew} – temperatura powietrza wewnątrz szklarni, (K)
- ρ_{wew} – gęstość powietrza wewnątrz szklarni, ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
- c_{wew} – ciepło właściwe powietrza wewnątrz szklarni, ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
- V_{sz} – objętość szklarni, (m^3)
- $Q_{osłona}$ – strumień ciepła wymienianego pomiędzy wnętrzem i osłoną, ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)
- $Q_{s.grzewczy}$ – strumień ciepła dostarczanego z systemu grzewczego, ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)
- $Q_{radiacja}$ – strumień ciepła dostarczanego z promieniowania słonecznego, ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Q_{went} – strumień ciepła wymienianego na skutek wentylacji, ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Q_{transp} – strumień ciepła wymienianego w wyniku transpiracji roślin, ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Q_{kond} – strumień ciepła dostarczanego w wyniku kondensacji, ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)

Na bilans ciepła składają się strumienie ciepła dostarczanego do szklarni: w wyniku kondensacji pary wodnej na osłonie, z systemu grzewczego, z promieniowania słonecznego oraz strumienie ciepła wymienianego podczas wentylacji, a także w wyniku transpiracji roślin. Wymiana ciepła przez osłonę może odbywać się w obu kierunkach.

Wielkość strumieni konwekcyjnej wymiany ciepła między poszczególnymi elementami szklarni i powietrzem wewnątrz szklarni zależy od współczynników wnikania ciepła α oraz od różnicy temperatur pomiędzy powierzchnią elementu i powietrzem. Strumienie te opisują następujące równania:

- dla konwekcyjnej wymiany ciepła między powietrzem wewnątrz szklarni a osłoną:

$$Q_{osłona} = \alpha_{osłona} A_{osłona} (T_{osłona} - T_{wew}) \quad (\text{J}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (2)$$

gdzie:

- $\alpha_{osłona}$ – współczynnik wnikania ciepła przez osłonę, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
- $A_{osłona}$ – powierzchnia osłony, (m^2)
- $T_{osłona}$ – temperatura osłony, (K)

- dla konwekcyjnej wymiany ciepła między powietrzem i systemem grzewczym:

$$Q_{s.grzewczy} = \alpha_{s.grzewczy} A_{s.grzewczy} (T_{s.grzewczy} - T_{wew}) \quad (\text{J}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (3)$$

gdzie:

- $\alpha_{s.grzewczy}$ – współczynnik wnikania ciepła z rur grzewczych, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
- $A_{s.grzewczy}$ – powierzchnia rur grzewczych, (m^2)
- $T_{s.grzewczy}$ – temperatura rur grzewczych, (K)

– dla konwekcyjnej wymiany ciepła w wyniku wentylacji:

$$Q_{went} = \alpha_{went} A_{went} (T_{zew} - T_{wew}) \quad (\text{J}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (4)$$

gdzie:

- α_{went} – współczynnik wymiany ciepła między powietrzem wewnątrz szklarni, a jej otoczeniem, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)
- A_{went} – powierzchnia wietrzników, (m^2)
- T_{zew} – temperatura powietrza zewnętrznego, (K)

Strumień ciepła pochodzący z promieniowania słonecznego wyrażony został uproszczoną zależnością (Tap, 2000):

$$Q_{radiacja} = A_{sz} 0,7 Rad \quad (\text{J}\cdot\text{s}^{-1}) \quad (5)$$

gdzie:

- Rad – natężenie promieniowania słonecznego, ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

Z analizy wyników badań symulacyjnych szklarni wynika, że w tym przypadku wartość 0,7 w równaniu (5) jest za wysoka i obniżono ją do poziomu 0,55.

Określenie wartości współczynników wnikania ciepła α jest skomplikowanym zadaniem. Przyczyną tego jest przede wszystkim duża liczba zmiennych w czasie czynników, mających wpływ na wartość współczynników. W niniejszym opracowaniu współczynniki wnikania ciepła obliczane są na podstawie podanych w literaturze modeli informacyjnych (Bot, 1983; Zwart, 1996), czyli wyznaczonych eksperymentalnie zależności między różnicą temperatur poszczególnych elementów i temperaturą powietrza w szklarni a wielkościami charakterystycznymi. Współczynniki te wyrażone są następującymi wzorami:

– współczynnik wymiany ciepła pomiędzy powietrzem i wewnętrzną stroną osłony (Zwart, 1996):

$$\alpha_{osłona} = 1,7(\cos \varphi)^{0,33} \cdot (T_{wew} - T_{osłona})^{0,33} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}) \quad (6)$$

gdzie:

- φ – kąt nachylenia dachu szklarni, ($^{\circ}$)
- współczynnik wymiany ciepła pomiędzy powietrzem i rurami systemu grzewczego górnego, z rurami umieszczonymi nad roślinami (Bot, 1983):

$$\alpha_{s,grzewczy\ 1} = 1,28 A_{s,grzewczy\ 1}^{-0,25} \cdot (T_{s,grzewczy\ 1} - T_{wew})^{0,25} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}) \quad (7)$$

– współczynnik wymiany ciepła pomiędzy powietrzem i rurami systemu grzewczego dolnego i wegetatywnego, gdy rury mają średnicę 51 mm i umieszczone są w strefie wzrostu roślin i pod rynnami uprawowymi (Bot, 1983):

$$\alpha_{s,grzewczy\ 2} = 1,99 A_{s,grzewczy\ 2} \cdot (T_{s,grzewczy\ 2} - T_{wew})^{0,32} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}) \quad (8)$$

- współczynnik wymiany ciepła pomiędzy powietrzem wewnątrz szklarni a jej otoczeniem podczas wentylacji naturalnej (Kurpaska, 2007):

$$\alpha_{went} = \rho_{wew} \cdot c_{wew} \cdot \Phi_{went} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (9)$$

gdzie:

Φ_{went} – prędkość przepływu powietrza przez wietrzniki, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

uwzględniający gęstość i ciepło właściwe powietrza wewnątrz szklarni oraz szybkość przepływu powietrza przez wietrzniki. W niniejszej pracy do obliczenia prędkości strumienia powietrza przepływającego przez wietrzniki wykorzystano uproszczoną zależność podaną w pracy Tap'a (2000):

$$\Phi_{went} = \left(\frac{\sigma \cdot K_z}{1 + \chi \cdot K_z} + \zeta + \xi \cdot K_n \right) \cdot v_{zew} + \psi \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (10)$$

gdzie:

K_n – stopień otwarcia wietrzników po stronie nawietrznej, (%)

K_z – stopień otwarcia wietrzników po stronie zawietrznej, (%)

v_{zew} – prędkość wiatru na zewnątrz szklarni, ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$\sigma, \chi, \zeta, \xi, \psi$ – wielkości stałe, których wartość wynosi odpowiednio: $\sigma = 7,1708 \cdot 10^{-5} (\%^{-1})$, $\chi = 0,0156 (\%^{-1})$, $\zeta = 2,7060 \cdot 10^{-5} (-)$, $\xi = 6,3233 \cdot 10^{-5} (\%^{-1})$, $\psi = 7,4 \cdot 10^{-5} (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$

Prędkość przepływu uzależniono tu od stopnia otwarcia wietrzników po stronie nawietrznej K_n i zawietrznej K_z oraz od prędkości wiatru na zewnątrz szklarni v_{zew} .

Dwa ostatnie strumienie ciepła Q_{transp} i Q_{kond} uwzględnione w bilansie ciepła to tzw. ciepło utajone. Jednym z nich jest ciepło Q_{transp} tracone na skutek transpiracji roślin (11), kiedy to podczas metabolizmu rośliny woda przechodzi z fazy ciekłej w gazową.

$$Q_{transp} = r_0 A_{liście} M_{transp} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (11)$$

gdzie:

r_0 – ciepło parowania lub kondensacji, ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)

$A_{liście}$ – powierzchnia liści uprawianych roślin, (m^2)

M_{transp} – strumień masy pobierany przez rośliny na skutek transpiracji odniesiony do m^2 powierzchni szklarni ($\text{kg}_{\text{par}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Drugim źródłem ciepła utajonego Q_{kond} jest kondensacja pary wodnej na osłonie. W wyniku skraplania się pary wodnej do otoczenia uwalniane jest ciepło:

$$Q_{kond} = r_0 A_{osłona} M_{kond} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (12)$$

gdzie:

M_{kond} – strumień masy pochodzący z kondensacji ($\text{kg}_{\text{par}} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Model wymiany masy

Zawartość pary wodnej w powietrzu wewnątrz szklarni jest ważnym parametrem środowiskowym, warunkującym właściwy rozwój roślin. Służy również do oceny ryzyka pojawienia się chorób i niepożądanego rozwoju szkodników.

Model opisujący zmiany zawartości pary wodnej w powietrzu wewnątrz szklarni bazuje na równaniu bilansu masy. Podstawowym źródłem pary wodnej w równaniu bilansu jest transpiracja roślin. Zawartość pary wodnej w powietrzu wewnątrz szklarni zmniejsza się na skutek kondensacji po wewnętrznej stronie osłony. Wymiana masy na skutek wentylacji może odbywać się w obu kierunkach, w zależności od panujących warunków wewnątrz i na zewnątrz szklarni. Równanie bilansu masy przyjmuje następującą postać:

$$\frac{V_{sz}}{A_{sz}} \frac{df_{wew}}{d\tau} = M_{transp} - M_{kond} - M_{went} \quad (13)$$

gdzie:

- A_{sz} – powierzchnia szklarni, (m^2)
- f_{wew} – zawartość wody w powietrzu wewnątrz szklarni, ($g \cdot m^{-3}$)
- M_{went} – strumień masy będący wynikiem wentylacji, ($kg_{par} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

W niniejszej pracy do określenia transpiracji roślin wykorzystano model regresji przedstawiony w pracy Kurpaski (2006), opracowany w celu określenia zapotrzebowania pomidorów szklarniowych na wodę, z uwzględnieniem sterowalnych czynników otaczającego klimatu, tj. nasłonecznienia Rad , temperatury powietrza wewnątrz szklarni T_{wew} i deficytu ciśnienia pary wodnej VPD .

$$M_{transp} = \frac{1}{120} (0,0025 \cdot Rad + 0,098 \cdot T_{wew} - 0,143 \cdot VPD + 0,05) \text{ (g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s)} \quad (14)$$

gdzie:

- VPD – deficyt ciśnienia pary wodnej, (Pa)

W celu uproszczenia opracowanego modelu wymiany masy przyjęto, że temperatura wewnętrznej strony osłony obliczana jest na podstawie równania (Kurpaska, 2007):

$$T_{osłona} = 0,4T_{zew} + 0,6T_{wew} \text{ (K)} \quad (15)$$

gdzie:

- $T_{osłona}$ – temperatura osłony, (K)

Natomiast kondensacja pary wodnej na wewnętrznej stronie osłony wyrażana jest zależnością (Tap, 2000):

$$\begin{cases} M_{kond} = m_1 |T_{wew} - T_{oslona}|^{m_2} (f_{wew} - f_{max\ wew}) & \text{gdy } f_{wew} > f_{max\ wew} \\ M_{kond} = 0 & \text{gdy } f_{wew} \leq f_{max\ wew} \end{cases} \quad (\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}) \quad (16)$$

gdzie:

$m_1 |T_{wew} - T_{oslona}|^{m_2}$ – współczynnik przenoszenia masy,
 m_1 i m_2 – stałe parametry współczynnika przenoszenia masy,
 $f_{max\ wew}$ – maksymalna zawartość wody w powietrzu wewnątrz szklarni ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Zmniejszenie lub zwiększenie (w mniejszym stopniu) zawartości pary wodnej w powietrzu wewnątrz szklarni odbywa się również poprzez wentylację. Ilość pary wodnej usuwanej ze szklarni opisana jest zależnością:

$$M_{went} = \Phi_{went} (f_{wew} - f_{zew}) \quad (\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}) \quad (17)$$

gdzie:

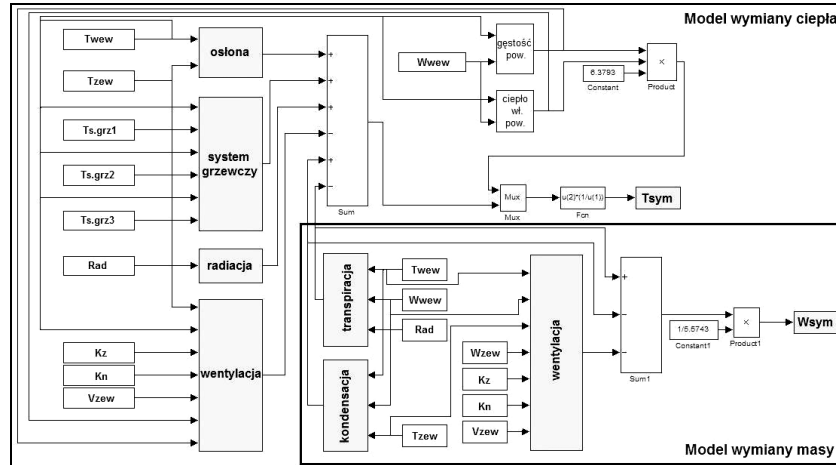
f_{zew} – zawartość wody w powietrzu zewnętrznym, ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Prędkość powietrza wymienianego przez wietrzniki obliczana jest z zależności (10) podanej w części pracy dotyczącej bilansu ciepła.

Model komputerowy i wyniki symulacji

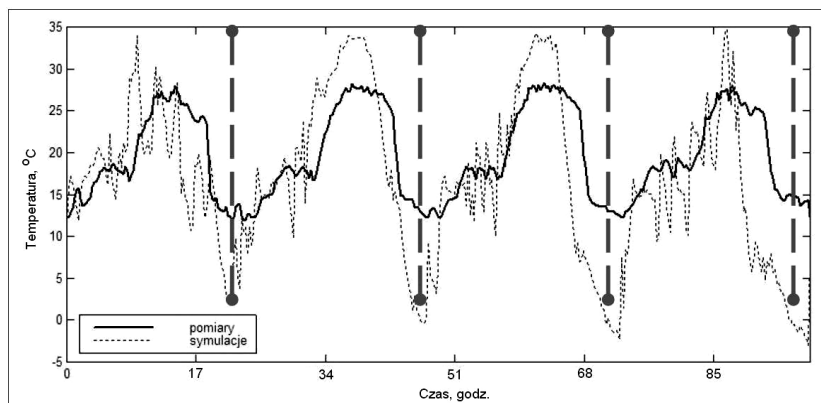
Opisane wcześniej modele wymiany ciepła i masy w powietrzu wewnątrz szklarni zostały zaimplementowane w programie MATLAB (toolbox Simulink). Na rysunku 1 przedstawiono schemat opracowanego komputerowego modelu wymiany ciepła i masy w powietrzu wewnątrz szklarni.

Opracowany model komputerowy został wykorzystany do przeprowadzenia symulacji, w wyniku których uzyskano przebiegi dobowych zmian temperatury i wilgotności powietrza wewnątrz szklarni. Przebiegi zmiennych wejściowych modelu symulacyjnego przedstawionego na rysunku 1 zostały wyznaczone podczas badań eksperymentalnych. Na rysunku 2 i rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki tych symulacji dla czterech kolejnych dni, a także wartości analizowanych parametrów uzyskane w trakcie badań eksperymentalnych, przeprowadzonych w szklarni. Przeprowadzone symulacje posłużyły do graficznej i statystycznej weryfikacji opracowanego modelu.



Rysunek 1. Schemat komputerowego modelu wymiany ciepła i masy w powietrzu wewnątrz szklarni. Oznaczenia: W_{wew} – wilgotność względna powietrza wewnątrz szklarni (%), W_{zew} – wilgotność względna powietrza na zewnątrz szklarni (%), T_{sym} – temperatura powietrza wewnątrz szklarni uzyskana w wyniku symulacji komputerowych ($^{\circ}C$), W_{sym} – wilgotność powietrza wewnątrz szklarni uzyskana w wyniku symulacji komputerowych ($kg_{pary} \cdot m^{-3}$ powietrza)

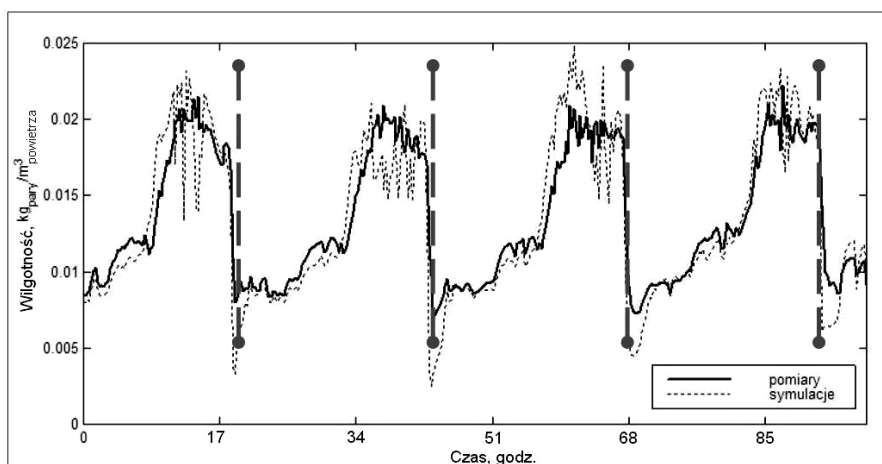
Figure 1. Schematic representation of the computer model of heat and mass exchange in air inside a greenhouse. Symbols: W_{wew} – relative humidity of air inside a greenhouse (%), W_{zew} – relative humidity of air inside a greenhouse (%), T_{sym} – air temperature inside a greenhouse obtained as a result of computer simulations ($^{\circ}C$), W_{sym} – humidity of air inside a greenhouse obtained as a result of computer simulations ($kg_{pary} \cdot m^{-3}$ powietrza)



Rysunek 2. Otrzymane podczas pomiarów i badań symulacyjnych zmiany temperatury powietrza wewnątrz szklarni

Figure 2. Air temperature changes inside a greenhouse obtained during measurements and simulation research

Analiza wyników symulacji pozwala na stwierdzenie logicznej poprawności opracowanego modelu. Umożliwia ona również określenie punktów krytycznych niedopasowania modelu. Stwierdzono, że w tym przypadku momentem takim jest zachód słońca, oznaczony na wykresach pionową linią \bullet — \bullet . Wskazuje to na silną korelację i wrażliwość mikroklimatu panującego w szklarni na ilość ciepła dostarczanego do obiektu na skutek promieniowania słonecznego.



Rysunek 3. Zmiany wilgotności powietrza wewnątrz szklarni uzyskane w wyniku pomiarów i symulacji komputerowych

Figure 3. Changes of air humidity inside a greenhouse obtained as a result of measurements and computer simulations

Do statystycznej weryfikacji opracowanego modelu wykorzystano wskaźnik determinacji (Makać i Urbanek, 2010):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad R^2 \leq 1 \quad (18)$$

gdzie:

- y_i – są wartościami badanej cechy uzyskanymi z pomiarów,
- Y_i – odpowiadające im wartości wyznaczone z modelu.

Im wartość wskaźnika determinacji jest bliższa 1, tym lepsza jest zgodność danych z modelu z danymi empirycznymi. Dla modelu wymiany ciepła wskaźnik determinacji (dla przykładowych czterech dni przedstawionych na rysunkach 2 i 3) wyniósł 0,87. Natomiast dla modelu wymiany masy wskaźnik ten wyniósł 0,97.

Podsumowanie

Na dokładność modelu wymiany ciepła wpływa przede wszystkim stopień jego uproszczenia, a także nieuwzględnienie w modelu innych strumieni ciepła. Odnosi się to zwłaszcza do ciepła wymienianego między stałymi elementami szklarni a powietrzem wewnątrz szklarni na drodze promieniowania. Brak tego strumienia ciepła w opracowanym modelu może tłumaczyć rozbieżność między danymi uzyskanymi podczas symulacji i danymi uzyskanymi podczas badań eksperymentalnych w okresie tuż po zachodzie słońca. Natomiast lepsze dopasowanie modelu wymiany masy może wynikać m.in. z mniejszej ilości zmiennych procesu, w porównaniu z ilością zmiennych biorących udział w procesie wymiany ciepła. Opracowany model matematyczny i utworzony na jego podstawie model komputerowy dostarczają wielu cennych informacji o złożonym systemie, jakim jest szklarnia. Dzięki możliwości przeprowadzania różnych symulacji można m.in. analizować wrażliwość układu na zmiany poszczególnych parametrów. Aby opracowany model mógł być wykorzystany, np. do celów sterowniczych, wymaga większego uszczegółowienia.

Literatura

- Boaventura Cunha, J. (2003). *Greenhouse Climate Models: An Overview*, EFITA Conference. Pozyskano z: http://automatica.dei.unipd.it/public/Schenato/TESI/Tosin_2009/materiale/GREENHOUSE%20CLIMATE%20MODELS%28stamp%29.pdf
- Bot, G.P.A. (1983). *Greenhouse Climate: from physical processes to a dynamic model*. PhD Thesis, Agricultural University of Wageningen. Pozyskano z: <http://www.library.wur.nl/WebQuery/clc/196119>
- Jong, de T. (1990): *Natural ventilation of large multi-span greenhouse*. Ph.D dissertation, Agricultural University of Wageningen. Pozyskano z <http://www.library.wur.nl/WebQuery/clc/282224>
- Kurpaska, S. (2006): Zapotrzebowanie na wodę pomidorów szklarniowych z uwzględnieniem sterownych czynników otaczającego klimatu. *Inżynieria Rolnicza*, 13(88), 261-269.
- Kurpaska, S. (2007). *Szklarnie i tunele foliowe*. Poznań, PWRiL, ISBN 978-83-09-01024-1
- Makać, W.; Urbanek-Krzysztofiak, D. (2010): *Metody opisu statystycznego*. Gdańsk, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, ISBN: 83-7017-597-X.
- Raczek, A. (2012). *Modelowanie klimatu szklarni*. Materiały IX Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki Wydziału Mechanicznego oraz V Ogólnopolskiej Konferencji Studenckich Kół Naukowych Uczelni Technicznych, Koszalin, ISBN 978-83-7365-297-2, 151-160.
- Tap, F. (2000). *Economics-based Optimal Control of Greenhouse Tomato Crop Production*, Thesis Wageningen Agricultural University. ISBN 9058082369. Pozyskano z: <http://www.library.wur.nl/WebQuery/clc/971399>
- Wachowicz, E. (2006). Lingwistyczny model procesów zachodzących w szklarni. *Inżynieria Rolnicza*, 12(87), 527-536.
- Zwart, de H.F. (1996). *Analyzing energy saving options in greenhouse cultivation using simulation model*. Ph.D. dissertation, Agricultural University of Wageningen, ISBN 90-5485-533-9. Pozyskano z: <http://www.library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/32454>

HEAT AND MASS EXCHANGE MODEL IN THE AIR INSIDE A GREENHOUSE

Abstract. The objective of the paper was to draw up a mathematical model of heat and mass exchange in air inside a big-size greenhouse, where a commodity cultivation of plants is carried out. During formulation of the model, inter alia, models described in literature and results of experimental research were used. A developed mathematical model was implemented to MATLAB/Simulink programme and simulations carried out with a computer model were used for carrying out graphical and statistical validation of a model. Analysis of simulation results allows statement of logical correctness of the developed model and makes possible to determined critical points of failure to adjust the model. Degree of simplification of the developed heat exchange model influences precision of the developed model. In order to use the developed model e.g. for control purposes, it requires to be more detailed.

Key words: greenhouse, microclimate, mathematical model, heat and mass exchange