

PROPOZYCJA MODELU WYMIANY CIEPŁA W SZKLARNI Z EKRANAMI TERMOIZOLACYJNYMI

Sławomir Grabarczyk

Politechnika Warszawska

Streszczenie. Współczesne obiekty szklarniowe są wyposażone w ruchome ekrany termoizolacyjne, które zmieniają charakterystykę termiczną pokrycia obiektu. Straty ciepła w szklarni powstają przede wszystkim w wyniku przewodzenia ciepła przez przegrody i infiltrację powietrza zewnętrznego. System grzewczy jest zwymiarowany na sumę tych dwóch strumieni ciepła. Kiedy ruchomy ekran termoizolacyjny jest używany w celu oszczędności energii, to system grzewczy nadal pokrywa straty ciepła przez przewodzenie i infiltrację bez dodatkowej zasłony, ponieważ ruchomy ekran może zostać otwarty wczesnym rankiem, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego jest najniższa. Teoretyczne i doświadczalne studia modeli przenikania ciepła szklarni z różnymi typami ekranów termoizolacyjnych były prowadzone przez różnych badaczy. Wymaga to weryfikacji opisu procesów wymiany energii cieplnej i masy w szklarni, ze zwróceniem szczególnej uwagi na przepuszczalność promieniowania przez pokrycie szklarni, wentylację, transpirację uprawy, przenikanie ciepła w podłożu, zaopatrzenie w energię cieplną i ekrany termoizolacyjne.

Słowa kluczowe: szklarnia, ekran termoizolacyjny, bilans energii

WSTĘP

Model wymiany ciepła w szklarni jest złożony i wprowadzenie dodatkowej przegrody w postaci ekranu termoizolacyjnego dodatkowo go komplikuje. Znalezienie najlepszego modelu pozwoli na właściwe opisanie, identyfikację i zrozumienie zjawisk występujących w obiekcie szklarniowym oraz prognozowanie zmian mikroklimatu szklarni i zużycia energii cieplnej, a także umożliwi przewidywanie zachowania obiektu przy zastosowaniu rozwiązań mających na celu zmniejszenie energochłonności.

Celem pracy jest przedstawienie modelu i zależności opisujących składniki bilansu cieplnego szklarni z osłoną w postaci ekranu termoizolacyjnego.

MATERIAŁ I METODY

Podstawą do rozważań nad metodami wymiarowania obiektów o lekkiej konstrukcji powinien być ich bilans cieplny i analiza poszczególnych procesów wymiany ciepła zarówno w stanie ustalonej równowagi, jak i w stanie nieustalonym. Do tego celu niezbędne są dane pomiarowe z rzeczywistych obiektów szklarniowych działających w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Różnorodność form współczesnych budynków szklarniowych i stosowanych w nich rozwiązań, mających na celu oszczędność energii, stwarza potrzebę przeprowadzenia takich badań w wielu obiektach, co jest kosztowne i pracochłonne. Poza tym znalezienie dostatecznej liczby obiektów, w których możliwa będzie realizacja tych zamierzeń, może nastęrczać wiele trudności. Pomiaru w warunkach rzeczywistej eksploatacji szklarni w większości przypadków wykluczają jakiegokolwiek możliwości zmian, przeprowadzanie doświadczeń, symulowanie pewnych zjawisk w warunkach terenowych na obiekcie, którego mikroklimat w znacznej mierze zależy od warunków zewnętrznych.

Wyniki badań własnych autora wskazują na duże możliwości poznawcze wynikające z zastosowania sieci neuronowych do analizy wymiany ciepła i masy w obiektach szklarniowych [Grabarczyk 2005a, b, c]. Sztuczne sieci neuronowe zastosowano m.in. do prognozowania warunków mikroklimatu szklarni z dodatkowymi osłonami oraz zużycia energii cieplnej w zmiennych warunkach klimatu zewnętrznego. Mając na uwadze powyższe, wskazane jest sprawdzenie istniejących modeli wymiany ciepła opisanych w literaturze i ich weryfikacja, tak aby w jak najdoskonalszy sposób odzwierciedlały zachowanie się obiektu szklarniowego z aktywną przegrodą w postaci ekranu termoizolacyjnego.

Zagadnienia wymiany ciepła w szklarni są często poruszane w literaturze, głównie ze względu na konieczność właściwego kształtowania mikroklimatu oraz prognozowania zużycia energii cieplnej. Ogólne równanie bilansu strumieni ciepła przedstawia się następująco:

$$q_{PSW} + q_{CO} = q_S + q_I \pm q_G + q_V + q_F \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (1)$$

gdzie: q_{PSW} – promieniowanie słoneczne docierające do wnętrza szklarni [$W \cdot m^{-2}$],

q_{CO} – strumień energii grzejnej [$W \cdot m^{-2}$],

q_S – straty ciepła na drodze przenikania przez powierzchnię osłony szklarni [$W \cdot m^{-2}$],

q_I – straty ciepła w wyniku wymiany powietrza przez nieszczelności [$W \cdot m^{-2}$],

q_G – strumień cieplny w podłożu [$W \cdot m^{-2}$],

q_V – straty ciepła w wyniku wietrzenia szklarni [$W \cdot m^{-2}$],

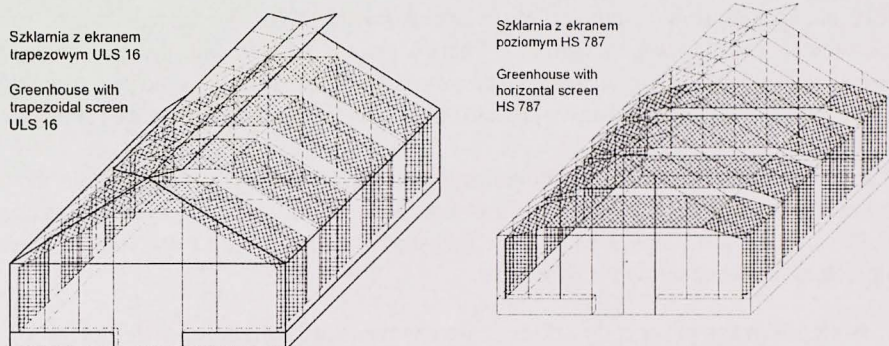
q_F – energia zużywana w procesie fotosyntezy [$W \cdot m^{-2}$].

Energia zużywana w procesie fotosyntezy (q_F) stanowi około 2–3% energii promieniowania docierającego do szklarni i z tego względu może tu zostać pominięta [Zabeltitz 1991].

W artykule opisano tylko te składniki bilansu cieplnego szklarni, które są charakterystyczne dla obiektów z ekranami zainstalowanymi wewnątrz i w których autor prowadzi kompleksowe pomiary mikroklimatu oraz zużycia energii cieplnej. Jednocześnie

wskazano na te elementy bilansu, które będą mogły być wykorzystane w przyszłych obliczeniach, po uzyskaniu pełnych danych pomiarowych.

W warunkach polskich ekrany termoizolacyjne instalowane są wewnątrz wolno stojących szklarni pojedynczych w dwojaki sposób (rys. 1).



Rys. 1. Ekrany termoizolacyjne wewnątrz szklarni pojedynczych
Fig. 1. Thermal screens in free-standing greenhouse

Strumień energii grzejącej

Strumień ciepła dostarczany do badanych szklarni jest mierzony przez zestawy ciepłomierzy podłączone do komputera rejestrującego (q_{CO}). Rejestracja zużycia energii cieplnej z interwałem 10 min pozwala na obserwację wpływu zewnętrznych czynników klimatycznych oraz parametrów opisujących funkcjonowanie wyposażenia technicznego szklarni, występujących w poszczególnych składnikach równania (1) bilansu strumienia ciepła.

Promieniowanie słoneczne

Zmniejszenie energii promieniowania słonecznego docierającego do wnętrza szklarni jest wywołane następującymi czynnikami: absorpcją w materiałach pokrycia oraz odbiciem od tych materiałów, zanieczyszczeniem powierzchni pokrycia, zacienieniem przez elementy konstrukcyjne dachu, a także kondensacją pary wodnej na wewnętrznej powierzchni pokrycia. Wartość energii promieniowania słonecznego otrzymujemy z zależności:

$$q_{PSW} = Dq_{PS} \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}] \quad (2)$$

gdzie: D – przepuszczalność pokrycia szklarni [%] ,

q_{PS} – energia promieniowania słonecznego padającego na poziomą płaszczyznę w terenie otwartym [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$].

Przepuszczalność pokrycia typowych konstrukcji szklarni przedstawił m.in. Zabeltitz [1991]. Producenci ekranów termoizolacyjnych, oprócz właściwości termoizolacyjnych, podają również przepuszczalność materiału dla promieniowania słonecznego

bezpośredniego i rozproszonego. Istotny wpływ na przepuszczalność promieniowania docierającego do wnętrza szklarni ma również kąt padania promieni słonecznych na powierzchnie pokrycia szklarni. Wskazane jest, aby przepuszczalność przegród zewnętrznych szklarni różnie zorientowanych i różnie nachylonych do poziomu terenu określać indywidualnie. W przypadku przegród wykonanych z różnych materiałów należy bezwzględnie określać osobno właściwości ich pokrycia, uwzględniając przepuszczalność światła, współczynniki odbicia i emisji. Zagadnienia przepuszczalności konstrukcji szklarni i właściwości materiałów stosowanych na pokrycia obiektów szklarniowych szerzej przedstawiają m.in. publikacje Deltoura i Pietersa [1999] oraz Desmarisa i innych [1999].

W szklarniach z ekranami termoizolacyjnymi konieczne jest uwzględnienie niecałkowitego ich domknięcia podczas cieniowania powierzchni uprawnej (jak pokazano na rys. 1). Umożliwia to lepszą wentylację przestrzeni pod ekranem i utrzymanie niższej temperatury w strefie uprawy roślin.

Straty ciepła przez przegrody szklarni oraz w wyniku infiltracji powietrza

W większości metod wymiarowania termicznego szklarni zapotrzebowanie na ciepło musi pokryć straty w wyniku przenikania (q_s) oraz straty ciepła związane z wymianą powietrza przez nieszczelności (q_l). Straty ciepła przez przenikanie w cienkościennych przegrodach zewnętrznych, jak również straty ciepła w wyniku infiltracji powietrza są zależne od rodzaju konstrukcji przegrody, a także w znacznym stopniu od szczelności. Szczególny charakter przegrody lekkiego obiektu budowlanego, jakim jest szklarnia, wymusił wprowadzenie do użycia ogólnego współczynnika przenikania ciepła, nazywanego także całkowitym (U'). Ogólny współczynnik przenikania ciepła stanowi sumę współczynnika określającego przenikanie ciepła przez przegrodę (U) i współczynnika strat ciepła na skutek wymiany powietrza (U_L).

$$U' = U + U_L \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (3)$$

Wartość tego współczynnika ustalana jest na podstawie badań wykonywanych dla obiektów rzeczywistych z różnymi materiałami pokrycia dachu oraz systemu ogrzewania i warunków atmosferycznych panujących na zewnątrz szklarni. Zależności ogólnego współczynnika przenikania ciepła (U') od prędkości wiatru przedstawiono m.in. w publikacjach Meyera [1981, 1982].

Jednoznaczne wartości U' uzyskuje się w przypadku szklarni z przegrodami podwójnymi ze szkła, płyt lub z dodatkową warstwą folii, np. pęcherzykowej, przytwierdzonej na stałe, gdzie łatwiej uzyskać właściwe uszczelnienie pokrycia. Natomiast w szklarniach z dodatkową ruchomą osłoną należy zwrócić uwagę na szczelność zamknięcia ekranu, co niejednokrotnie wpływa na wielkość rzeczywistych strat ciepła i uzyskiwaną wartość współczynnika U' . Przy ustalaniu strat ciepła przez przegrodę zewnętrzną szklarni pożądaną staje się analiza wymiany ciepła z uwzględnieniem właściwości poszczególnych materiałów pokrycia.

Opór cieplny przegrody z uwzględnieniem poszczególnych sposobów wymiany ciepła można obliczyć z zależności [Bot i in. 1999]:

$$R = \frac{1}{\alpha_{Si}} + \sum \left(\frac{\lambda}{d} + \alpha_r \right)^{-1} + \frac{1}{\alpha_{Se}} = \frac{1}{U} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}] \quad (4)$$

gdzie: α_{Si} – współczynnik przyjmowania ciepła po stronie pomieszczenia [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 λ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału pokrycia [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 d – grubość materiału pokrycia [m],
 α_{Se} – współczynnik przyjmowania ciepła po stronie zewnętrznej [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 α_r – radiacyjny współczynnik przyjmowania ciepła między warstwami pokrycia [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

Jednostkowy strumień energii cieplnej (q_S) na drodze przenikania ciepła przez pokrycie zewnętrzne szklarni ustala się ze wzoru:

$$q_S = U(T_i - T_e) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (5)$$

gdzie: T_i – temperatura powietrza wewnętrznego [K],

T_e – temperatura powietrza zewnętrznego [K].

Strumień energii cieplnej (q_1) pokrywający straty ciepła na podgrzanie powietrza infiltrującego do szklarni można obliczyć ze wzoru:

$$q_1 = \frac{A_O}{A_G R_L} (T_i - T_e) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (6)$$

gdzie: A_O – powierzchnia przegrody (ściany i dach) szklarni [m^2],

A_G – powierzchnia podłoża w szklarni [m^2].

R_L – opór przenikania ciepła w wyniku wymiany powietrza przez nieszczelności, [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$].

Opór przenikania ciepła w wyniku infiltracji powietrza (R_L) należy traktować bardziej jako wskaźnik. Trudności sprawia właściwe określenie znaczenia tego elementu w zmiennych warunkach klimatycznych.

Ekran termoizolacyjny w szklarni zmniejsza infiltrację chłodnego powietrza do szklarni i związane z tym straty ciepła. Należy jednak zaznaczyć, że jeśli odległość między ekranem a pokryciem ze szkła będzie większa niż 0,2 m, to należy zwrócić uwagę na wymianę ciepła także na drodze konwekcji między pokryciem a ekranem termoizolacyjnym.

W obiektach szklarniowych z ekranami ruchomymi instalację ogrzewania wymiaruje się na podstawie zapotrzebowania na ciepło, określonego jako suma strumieni ciepła q_S i q_1 , bez uwzględnienia właściwości termoizolacyjnych dodatkowych ekranów. Uzasadnia to sytuacja ekstremalna, jaka może się pojawić podczas otwierania ekranów termoizolacyjnych w godzinach rannych czy też w przypadku wystąpienia intensywnych opadów śniegu oraz konieczności jego topienia i usuwania z połaci dachowych.

Wietrzenie szklarni

Energia cieplna odprowadzana w wyniku wietrzenia szklarni składa się z części jawnej q_{V1} i utajonej q_{V2} . Strumień ciepła jawnego odprowadzany z powietrzem wentylacyjnym oblicza się ze wzoru:

$$q_{v1} = \frac{\phi_v}{A_G} c_p \rho (T_i - T_e) \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (7)$$

gdzie: ϕ_v – strumień powietrza wentylacyjnego [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
 c_p – ciepło właściwe powietrza [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 ρ – gęstość powietrza [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

W celu obliczenia wymiany powietrza postanowiono wykorzystać metodę, w której uzależniono wielkość strumienia powietrza usuwanego przez wietrzniki kalenicowe od kąta jego otwarcia [Stanghelini i de Long 1995].

Strumień powietrza usuwanego przez wietrzniki kalenicowe w wyniku naturalnej konwekcji jest sumą strumienia powietrza wypływającego przez czołową część powstałego otworu (ϕ_{bf}) (równoległego do kalenicy) oraz dwie boczne powierzchnie (ϕ_{bs}):

$$\phi_b = \phi_{bf} + \phi_{bs} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8)$$

Poszczególne strumienie są obliczane według niżej przedstawionych zależności:

– strumień powietrza wypływającego przez czołową część wietrznika kalenicowego

$$\phi_{bf} = C_f (g\beta)^{1/2} \frac{L_o}{3} H^{3/2} (T_i - T_e)^{1/2} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9)$$

gdzie: C_f – współczynnik wypływu,

g – przyspieszenie ziemskie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

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

L_o – długość otwarcia [m],

H – pionowa wysokość otwarcia wietrznika [m]; wysokość otwarcia wietrznika (H) ustalana jest z zależności:

$$H = H_o [\sin \psi - \sin(\psi - \alpha)] \quad [\text{m}] \quad (10)$$

gdzie: H_o – wysokość wietrznika [m],

ψ – kąt nachylenia połaci dachowej szklarni [...°],

α – kąt otwarcia wietrznika [...°],

– strumień powietrza wypływającego przez dwie boczne powierzchnie wietrznika kalenicowego

$$\phi_{bs} = 2C_f 0,146 (g\beta)^{1/2} \frac{\sin \alpha}{\sin \psi} [\sin(\psi - \alpha)]^{3/2} H_o^{5/2} (T_i - T_e)^{1/2} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

Strumień powietrza uwzględniający wpływ prędkości wiatru oblicza się z zależności:

$$\phi_w = wG(\alpha)L_oH_o \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (12)$$

gdzie: G_α – wielkość opisująca zależność strumienia powietrza wentylacyjnego w funkcji wielkości wietrznika kalenicowego oraz kąta jego otwarcia,

w – prędkość wiatru [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Całkowity strumień powietrza przepływający przez wietrzniki kalenicowe, uwzględniający wpływ działania siły wyporu termicznego oraz działanie wiatru, oblicza się ze wzoru:

$$\phi_v = (\phi_b^2 + \phi_w^2)^{1/2} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (13)$$

Przedstawiona metoda nie uwzględnia wpływu ekranów termoizolacyjnych wewnątrz szklarni na ograniczenie wymiany powietrza. Wyniki badań Wolskiego i Grabarczyka [2002] wskazują, że w okresie letnim podczas cieniowania powierzchni szklarni strumień powietrza wymienianego ulega zmniejszeniu. Nie stwierdzono jednoznacznie, czy jest to związane tylko z ekranem utrudniającym wymianę powietrza. Możliwe, że jest to również skutek zmniejszonego strumienia ciepła od promieniowania słonecznego, a tym samym niższej temperatury w strefie uprawy roślin i mniejszej siły wyporu termicznego.

Strumień ciepła utajonego odprowadzany z powietrzem wentylacyjnym oblicza się ze wzoru:

$$q_{v2} = E_v f D q_{psw} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (14)$$

gdzie: E_v – stosunek ewapotranspiracji do padającej energii promieniowania słonecznego.

Strumień energii utajonej oblicza się przy założeniu, że ilość pary wodnej odprowadzanej w wyniku wentylacji jest równa ilości wody odparowanej przez glebę i rośliny oraz że szybkość ewapotranspiracji jest proporcjonalna do strumienia energii cieplnej i od promieniowania słonecznego dostępnego w szklarni.

Przedstawiona metoda obliczania strumienia ciepła usuwanego z powietrzem wentylacyjnym ze szklarni jest korzystna, ponieważ umożliwia obliczanie wymiany ciepła w szklarniach, w których prowadzone są uprawy o dość dużych wymaganiach wilgotnościowych. W warunkach występowania nadmiaru wilgoci wewnątrz szklarni wietrzniki są otwierane w celu jej usunięcia, co w konsekwencji prowadzi do zwiększonych strat ciepła.

Wymiana ciepła z gruntem

W większości metod wymiarowania termicznego szklarni straty ciepła do gruntu nie są brane pod uwagę. Nie mniej jednak, oprócz instalacji ogrzewczej, jest to w zasadzie jedyny element składowy bilansu, który cechuje się właściwością akumulacji cieplnej.

Obliczenie strumienia ciepła w podłożu szklarni wykonuje się metodą opisaną przez Mitalasa [1987]. Uwzględnia ona dwuwymiarowy przepływ ciepła, a w narożnikach szklarni także trójwymiarowy. Metoda ta uwzględnia przepływ ciepła z podziałem obszaru na cztery elementy składowe:

- ściana fundamentowa do głębokości 0,6 m poniżej podłoża,
- ściana fundamentowa poniżej 0,6 m,
- podłoże przyległe do ściany fundamentowej,
- podłoże w centralnej części obiektu.

Wymiana ciepła w gruncie odgrywa większą rolę przede wszystkim w warunkach występowania wewnątrz szklarni niskiej temperatury. Przewiduje się, że zostaną wykonane dodatkowe badania w celu ustalenia i ewentualnej weryfikacji przepływu strumienia ciepła w podłożu obiektów szklarniowych z ekranami termoizolacyjnymi.

DYSKUSJA

Zwrócono uwagę przede wszystkim na te składniki bilansu, które zamierza się wykorzystać w analizach dotyczących wymiany ciepła i masy w obiektach szklarniowych z dodatkowymi osłonami termoizolacyjnymi. Możliwe, że w trakcie analiz okaże się, że trzeba będzie skorzystać z innych opisów wymiany ciepła lub zmodyfikowanych zależności dotyczących elementarne składniki bilansu cieplnego szklarni z ekranem termoizolacyjnym.

Podstawowym zagadnieniem będzie prawidłowe określenie wielkości, których zmienność może zależeć od trudnych do zmierzenia lub podlegających znaczącym wahaniom parametrów. Dotyczy to m.in. współczynników przejmowania ciepła na powierzchniach przegród szklarni czy też oporu przenikania ciepła w wyniku strat związanych z wymianą powietrza (R_L).

Zamierza się wskazać składniki bilansu, które będą miały główne znaczenie oraz których znaczenie będzie drugorzędne lub nie będą istotne, a ich wpływ na końcowy wynik będzie niewielki. Analogicznie te wielkości i parametry, występujące w zależnościach, które będą miały istotne znaczenie, zostaną wyekspozowane.

PODSUMOWANIE

Modele wymiany ciepła, szczególnie w przypadku szklarni, zostały szeroko przedstawione w literaturze tematu. Znaczna ich część może zostać wykorzystana do prowadzenia obliczeń ze względu na praktyczne walory, natomiast niektóre z nich nie zostały zweryfikowane przez autorów.

Ze wstępnych analiz wynika, że dla poprawności wyników obliczeń istotne jest zwrócenie uwagi na: przyjęcie właściwych parametrów występujących w zależnościach oraz chwilowe wahania niektórych zmiennych, które mogą „zakłócać” otrzymany wyniki.

Weryfikacja zaproponowanych modeli cieplnych opisanych w literaturze tematu została przeprowadzona na podstawie badań własnych oraz rzeczywistych parametrów eksploatacyjnych uzyskanych w rzeczywistych obiektach szklarniowych z różnymi typami ekranów termoizolacyjnych.

Ponadto planuje się porównanie wyników dla modeli wymiany ciepła zweryfikowanych lub adaptowanych dla obiektów szklarniowych z ekranami termoizolacyjnymi z wynikami otrzymanymi z modeli neuronowych (SSN).

PIŚMIENNICTWO

- Bot G.P.A., van Loon W.K.P., Saye A. i de Zwart H.F., 1999. The solar greenhouse: a survey of energy saving methods. Proceedings of the International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques Towards the 3rd Millennium, Haifa, 131–138.
- Deltour J.M., Pieters J.G., 1999. Modelling solar energy input in greenhouses. *Solar Energy* 67 (1–3), 119–130.
- Desmaris G., Ratti C., Raghavan G.S.V., 1999. *Solar Energy* 65 (5), 271–284.
- Grabarczyk S., 1999. Wpływ zastosowania ekranów termoizolacyjnych w obiektach szklarniowych na zużycie energii. Praca doktorska. Płock.
- Grabarczyk S., 2005a. Prognozowanie zmian mikroklimatu szklarni w okresie letnim. *Czasopismo Nauk. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce*, T. 1, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Łódź, 103–110.
- Grabarczyk S., 2005b. Prognozowanie zużycia energii cieplnej w szklarniach z ekranami termoizolacyjnymi. Materiały XI Międzynarodowej Konferencji „Air Conditioning, Air Protection & District Heating”. Wrocław – Szklarska Poręba, 175–180.
- Grabarczyk S., 2005c. Prognozowanie zmian mikroklimatu szklarni z ruchomymi osłonami termoizolacyjnymi. Materiały Międzynarodowej Konferencji „Energy Efficient Technologies in Indoor Environment”. Gliwice, Proceedings – Full Texts (on CD-ROM), Paper 11 (in Polish).
- Meyer J., 1981. *Bewegliche Energieschirme*. ITG Hannover.
- Meyer J., 1982. *Bewertung von beweglichen Energieschirmen in Hinblick auf dem Wärmeverbrauch von Gewachshausern*. ITG Hannover.
- Mitalas G.P., 1987. Calculation of Below-Grade Residential Heat Loss: Low-Rise Residential Building. *ASHRAE Transactions*, 93(1), 743–784.
- Stanghelini C., de Long T., 1995. A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology* 76, 129–148.
- Wolski L., Grabarczyk S., 2000. Ogólny współczynnik przenikania ciepła w wymiarowaniu termicznym nowoczesnych obiektów szklarniowych. Materiały XLVI Konferencji Naukowej „Problemy naukowo-badawcze budownictwa”. KILiW PAN i KN PZITB, Wrocław – Krynica, 147–154.
- Wolski L., Grabarczyk S., 2002. Skuteczność wentylacji naturalnej w szklarni z dodatkowymi osłonami. Materiały konferencyjne „Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce 2001”. Wydawnictwo Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 339–348.
- Zabeltitz Ch., 1991. *Szklarnie – projektowanie i budowa*. PWRiL, Warszawa.

HEAT TRANSFER MODEL OF GREENHOUSE WITH THERMAL SCREEN

Abstract. Modern greenhouse structures are equipped with movable thermal screens with shadow and energy-saving properties, which change a thermal profile of a structure. Heat loss from greenhouses is caused primarily by conduction through the cover and infiltration of outdoor air. The heating system is designed to meet the sum of the two. When movable thermal screen is used to conserve energy, heating systems are still designed to match conduction and infiltration losses without curtain because movable screen may be opened early in the morning when outdoor air temperature is near its minimum. Theoretical and experimental studies have been carried out by several researchers to study microclimate and heat transfer model of greenhouse with different type of thermal screens. It

demand careful quantification of various energy and mass transfer processes in the greenhouse, with special attention to light transmission of the cover, ventilation, crop transpiration, heat transfer in soil, energy supply and thermal screens.

Key words: greenhouse, thermal screen, energy balance

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.05.2006