

*Sławomir Kurpaska, Rafał Stokłosa*  
*Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki*  
*Akademia Rolnicza w Krakowie*

## **WPLYW NATĘŻENIA PROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO NA ZUŻYCIE CIEPŁA W TUNELU FOLIOWYM**

### **Streszczenie**

Celem pracy było określenie wpływu natężenia promieniowania słonecznego na zużycie ciepła. W wyniku analizy wyznaczono współczynnik uwzględniający zmianę intensywności konwersji promieniowania słonecznego w funkcji parametrów otaczającego klimatu. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano nomogram, który pozwala na oszacowanie strumienia ciepła dostarczonego od systemu grzejnego ogrzewanego tunelu, w zależności od różnicy temperatur i istniejącego promieniowania słonecznego.

**Słowa kluczowe:** promieniowanie słoneczne, zużycie ciepła, tunel foliowy

### **Wstęp**

Wzrost powierzchni uprawowej w tunelach i szklarniach powoduje zwiększoną emisję substancji szkodliwych do środowiska, powstałych w wyniku spalania paliw kopalnych. Jak wykazują liczne badania, roczne zapotrzebowanie ciepła potrzebne do ogrzania jednostkowej powierzchni uprawy w szklarni wynosi około  $1800\text{MJ/m}^2$ . Natomiast w tunelach foliowych gdzie uprawa przebiega sezonowo (od marca do listopada) zapotrzebowanie to wynosi około  $700\text{MJ/m}^2$  [Tymiński 1997]. Wzrastające ceny paliw powodują zwiększenie kosztów produkcji pod osłonami. Przeprowadzona analiza [Kurpaska 2000] wykazała, że w warunkach polskiego klimatu nakłady energii cieplnej na ogrzewanie obiektów pod osłonami stanowią niekiedy blisko 70% ogólnych kosztów produkcji. Z tego powodu konieczne jest poszukiwanie rozwiązań dążących do zmniejszenia zapotrzebowania na ciepło przez obiekt, np. instalując w obiekcie odbłyśnikowe, ekrany zagrzejnikowe, ekrany ciepła czy też modernizując systemy grzewcze [Critten i Bailey 2002; Kurpaska 2002; Zhang i wsp. 1995].

Duża transparentność i mała izolacyjność pokrycia obiektów ogrodnich sprawia, że obiekty te są podatne na promieniowanie słoneczne. Przenikające przez osłonę promienie słoneczne, powodują gwałtowny wzrost temperatury wewnątrz obiektu. Nadmiar ciepła powoduje powstanie niekorzystnych warunków termicznych dla uprawianych roślin. Stąd powstaje konieczność stosowania wentylacji obiektu, a co się z tym wiąże powstanie strat ciepła. Obniżenie temperatury można również uzyskać poprzez zwiększenie wilgotności powietrza. Zbyt wysoka wilgotność sprzyja jednak zmniejszeniu intensywności transpiracji, powoduje skraplanie pary wodnej, czego skutkiem jest mechaniczne niszczenie uprawianych roślin oraz powstawaniu chorób grzybowych. Racjonalnie uzasadnione wydaje się, więc magazynowanie nadwyżki ciepła i późniejsze jego wykorzystanie w okresie braku promieniowania słonecznego [Kaiser 1995]. Określenie na drodze teoretycznej zużycia ciepła w obiekcie powstałego w wyniku promieniowania słonecznego jest trudne m.in. z powodu: kąta padania promieni słonecznych, pora dnia i roku, wyposażenie techniczne obiektu.

Stąd celem pracy jest określenie wpływu natężenia promieniowania słonecznego na zużycie ciepła w tunelu foliowym. Praca ta ma cel zarówno poznawczy, czyli powiększenie wiedzy naukowej, oraz aplikacyjny, bowiem otrzymane wyniki można wykorzystać do określenia parametrów wody grzejnej oraz oszacowania nadwyżki ciepła, które można zmagazynować w akumulatorach.

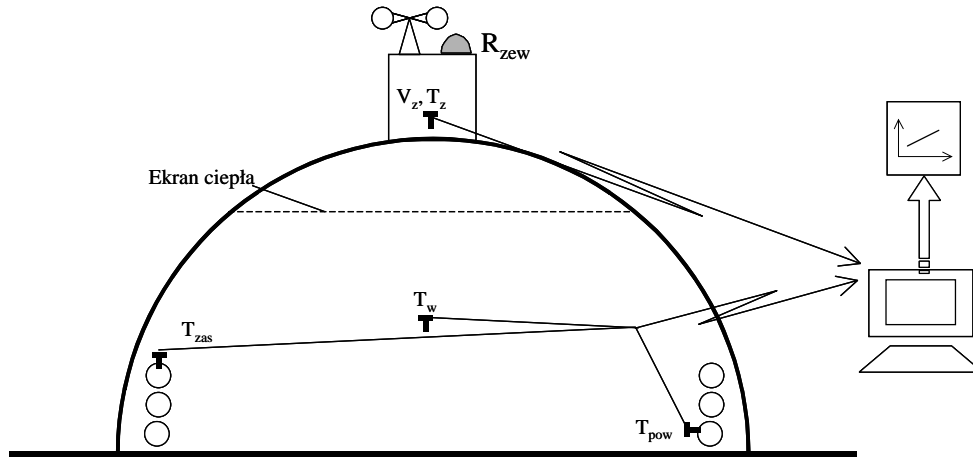
## **Materiał i metoda**

Bezpośredni wpływ na ilość ciepła potrzebną do ogrzewania tunelu mają czynniki klimatyczne oraz parametry konstrukcyjne obiektu. Analizując jednostkowe zapotrzebowanie ciepła w tunelu, konieczne jest określenie strumieni ciepła oraz bilansu badanego obiektu (rys. 1).

Bilans strumieni ciepła w obiekcie można zapisać następująco:

$$q_{wew} = q_{rad} + q_{grz} - q_{str} - q_{ET} - q_{prz} - q_{inf} \quad (1)$$

Poszczególne strumienie ciepła oznaczają:  $q_{wew}$  – ciepło wewnątrz obiektu (W),  $q_{rad}$  – ciepło radiacji (W),  $q_{grz}$  – ciepło doprowadzone od grzejników (W),  $q_{str}$  – ciepło przenikane do otoczenia (W),  $q_{ET}$  – ciepło zużyte w procesie ewapotranspiracji (W),  $q_{prz}$  – ciepło przewodzone w głąb profilu glebowego, (W)  $q_{inf}$  – ciepło infiltracji (W). Ponieważ ostatnie trzy składowe bilansu przyjmują niewielkie wartości (w obiekcie nie prowadzono żadnej uprawy), więc w dalszych obliczeniach zostały pominięte.



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego  
Fig. 1. Layout of measuring stand

Ilość ciepła [J] zgromadzoną w badanym tunelu w rozpatrywanym przedziale czasowym  $[\Delta\tau]$  wyliczono ze wzoru:

$$q_{wew}(\tau) = \rho_{pow} \cdot V \cdot C_p \cdot [t_{wew}(\tau_1) - t_{wew}(\tau_2)] \quad (2)$$

gdzie:  $\rho_{pow}$  – gęstość powietrza w szklarni ( $\text{kg/m}^3$ ),  $t_{wew}$  – temperatura powietrza wewnątrz szklarni ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $V$  – objętość powietrza w szklarni ( $\text{m}^3$ ),  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – początkowy i końcowy czas rozpatrywanego procesu (s).

Ciepło doprowadzone do obiektu z zewnątrz z promieniowania słonecznego:

$$q_{rad}(\tau) = R_{zew} \cdot F_{tun} \cdot \Delta\tau \cdot i \quad (3)$$

gdzie:  $R_{zew}$  – natężenie promieniowania słonecznego ( $\text{W/m}^2$ ),  $F_{tun}$  – powierzchnia tunelu ( $\text{m}^2$ ) zaś  $i$  – współczynnik (uwzględniający procesy pochłaniania, odbicia i absorpcji promieni słonecznych).

Ciepło dostarczone do wnętrza tunelu od grzejników:

$$q_{grz}(\tau) = F_{grz} \cdot k_{grz} \cdot \left( \frac{t_{zas} + t_{pow}}{2} - t_{wew} \right) \cdot \Delta\tau \quad (4)$$

gdzie:  $F_{grz}$  – powierzchnia grzejników ( $\text{m}^2$ ),  $k_{grz}$  – współczynnik przenikania ciepła ( $\text{W/m}^2\text{k}$ ),  $t_{zas}$  – temperatura wody zasilającej grzejniki ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t_{pow}$  – temperatura wody powrotnej z grzejników ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Ciepło przenikające do otoczenia poprzez osłony tunelu:

$$q_{str}(\tau) = F_{osl} \cdot k_{osl} \cdot (t_{wew} - t_{zew}) \cdot \Delta\tau \quad (5)$$

gdzie:  $F_{osl}$  – powierzchnia osłony tunelu ( $m^2$ ),  $t_{zew}$  – temperatura zewnętrzna ( $^{\circ}C$ ),  $k_{osl}$  – współczynnik przenikania ciepła przez osłonę ( $W/m^2 K$ ).

Po podstawieniu do wzoru (1) wartości poszczególnych strumieni ciepła oraz po przekształceniu otrzymujemy końcowy wzór na współczynnik:

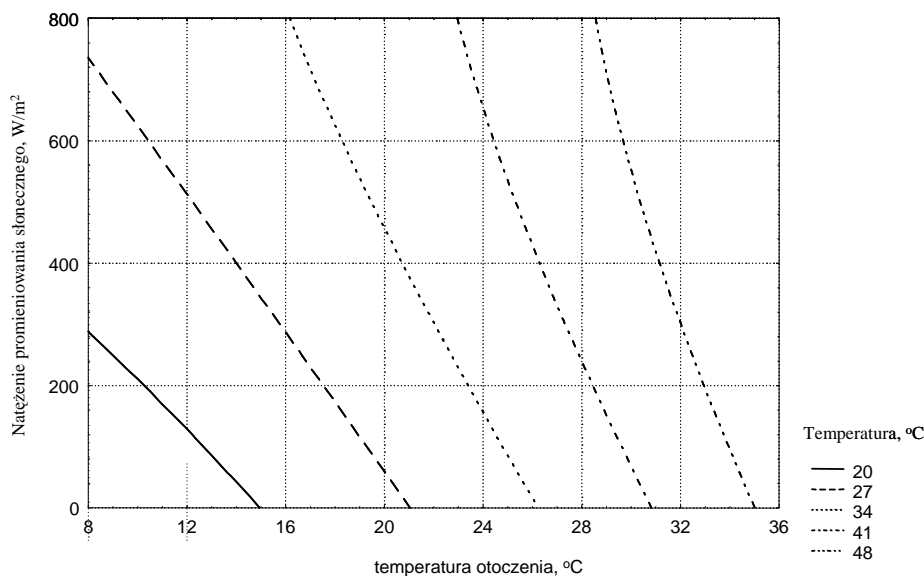
$$i = \frac{\rho_{pow} \cdot V \cdot C_p \cdot \Delta t_{wew} - F_{grz} \cdot k_{grz} \cdot (t_{grz} - t_{wew}) \cdot \Delta\tau + F_{osl} \cdot k_{osl} \cdot (t_{wew} - t_{zew}) \cdot \Delta\tau}{R_{zew} \cdot F_{tun} \cdot \Delta\tau} \quad (6)$$

Współczynniki  $k_{grz}$  oraz  $k_{osl}$  odczytano z pracy [Kurpaska 2002], zaś koncentrację pary wodnej w powietrzu oraz ciepło właściwe powietrza obliczono ze standardowych zależności psychrometrycznych.

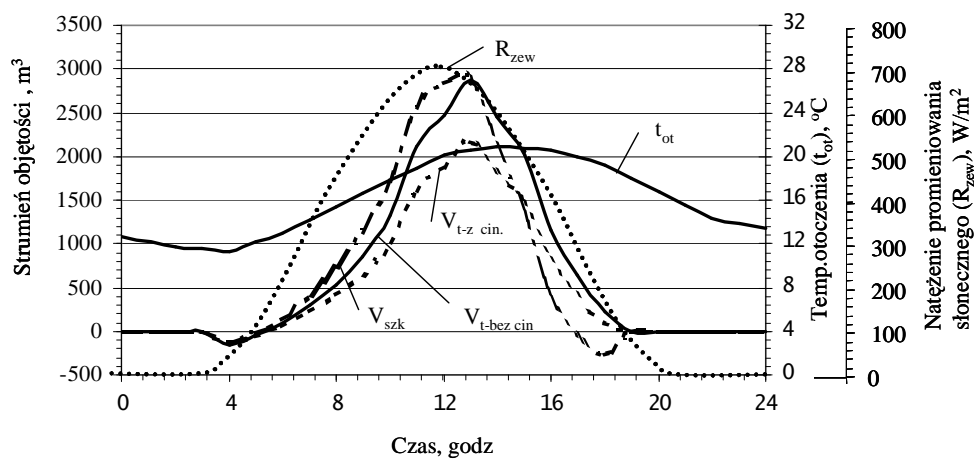
## Wyniki badań i dyskusja

Badania przeprowadzono w tunelu doświadczalnym o wymiarach 6 x 9m zlokalizowanym w obiektach Wydziału Agrotechnologii AR w Krakowie. Podczas badań, przy pomocy komputerowego systemu pomiarowego monitorowano parametry klimatu wewnątrz tunelu (temperatura i wilgotność powietrza, temperatura zasilania i powrotu wody grzejnej) oraz na zewnątrz tunelu (temperatura otoczenia, prędkość wiatru i natężenie promieniowania słonecznego). Obliczenia wykonano dla założonych parametrów wejściowych: objętość powietrza w tunelu  $V = 127 m^3$ , powierzchnia osłony  $F_{osl} = 113 m^2$ , powierzchnia tunelu  $F_{tun} = 54 m^2$ , ciepło przemiany fazowej wody  $L = 2500 KJ/kg$ , współczynnik przenikania ciepła od grzejników  $k_{grz} = 6,57 W/m^2 K$ .

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg mierzonych parametrów funkcji czasu dla wybranego dnia eksperymentu. Można zauważyć, że wzrost natężenia promieniowania słonecznego powoduje podniesienie temperatury wewnątrz tunelu, zaś system regulacji w obiekcie spowodował obniżenie temperatury grzejników. Wykres warstwowy przedstawiony na rysunku 3, przedstawia zmiany wyliczonego współczynnika  $i$  w zależności od promieniowania słonecznego oraz różnicy temperatury. Wartości przedstawione na wykresie zostały opracowane na podstawie badań przeprowadzonych podczas całego sezonu grzewczego. Analizując ten wykres można zauważyć, że wzrost natężenia promieniowania słonecznego powoduje zmniejszenie wartości współczynnika, natomiast wzrost różnicy temperatur wpływa na zwiększenie wartości tego współczynnika.



Rys. 2. Temperatura wewnątrz tunelu - tunel bez ekranu ciepła  
 Fig. 2. Temperature inside tunnel – film tunnel without temperature shield



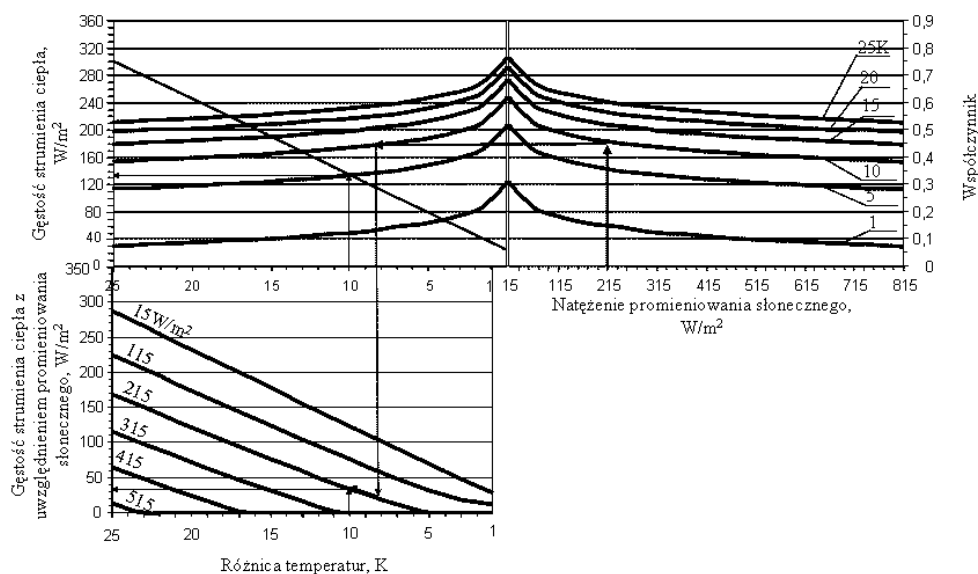
Rys. 3. Wymagana ilość powietrza w analizowanych obiektach oraz warunki klimatyczne w czerwcu  
 Fig. 3. Quantity of air required in objects under research and climatic conditions in June

Przeprowadzona analiza statystyczna wykazała istotny wpływ analizowanych zmiennych niezależnych (natężenia promieniowania słonecznego i różnicy temperatur) na wartość współczynnika. Związek pomiędzy współczynnikiem a zmiennymi niezależnymi opisano krzywoliniowym modelem regresji wielokrotnej w postaci:

$$i = 1,5 \cdot R_{zew}^{-0,05} + 1,2 \cdot \Delta t^{0,1} - 2,2$$

Formuła ta jest prawdziwa dla zakresu zmiennych:  $10 < R_{zew} < 810 \text{ W/m}^2$ ,  $1 < \Delta t < 25 \text{ K}$ .

Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano nomogram (rys. 4), który pozwala na oszacowanie strumienia ciepła dostarczonego od systemu grzejnego ogrzewanego tunelu, w zależności od różnicy temperatur i obecnego promieniowania słonecznego.



Rys. 4. Nomogram do szacowania zużycia ciepła w tunelu foliowym

Nomogram składa się z trzech ćwiartek układu współrzędnych. W I ćwiartce układu współrzędnych przedstawiono przebieg współczynnika w zależności od promieniowania słonecznego i różnicy temperatur. W II przedstawiono całkowite zapotrzebowanie ciepła w tunelu w zależności od różnicy temperatur. Natomiast III ćwiartka obrazuje zapotrzebowanie ciepła w tunelu po uwzględnieniu ciepła radiacji, czyli zapotrzebowanie na ciepło, które musi być dostarczone od grzejników, również w zależności od różnicy temperatur dla danego natężenia promieniowania słonecznego.

## Wnioski

1. Zależność współczynnika  $i$  od natężenia promieniowania słonecznego i różnicy temperatur opisuje równanie regresji wielokrotnej w postaci:  
 $i = 1,5 \cdot R_{zew}^{-0,05} + 1,2 \cdot \Delta t^{0,1} - 2,2$  w zakresie stosowania  $10 < R_{zew} < 810$  W/m<sup>2</sup>,  
 $1 < \Delta t < 25$  K.
2. Wyznaczony monogram pozwala na oszacowanie strumienia ciepła dostarczonego od systemu grzejnego ogrzewanego obiektu w zależności od różnicy temperatury i obecnego promieniowania słonecznego.

## Bibliografia

Critten D.L., Bailey B.J. 2002. A review of greenhouse engineering developments during the 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology*. 112. 1-22.

Kaiser H. 1995. Wykorzystanie energii słonecznej. Wydawnictwo AGH Kraków

Kurpaska S. 2000. Analiza teoretyczno-doświadczalna systemu ogrzewania podłoga ogrodniczego ciepłym powietrzem. Rozprawa habilitacyjna. Zesz. Nauk. AR w Krakowie.

Kurpaska S. 2002. Analiza wykorzystania energii słonecznej do ogrzewania obiektów pod osłonami. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*. Z. 485. str. 177-185.

Tymiński J. 1997. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2030 roku. Aspekt energetyczny i ekologiczny. IBMER Warszawa.

Zhang Y., Gauthier L., Halleux de D., Dansereau B., Gosselin A. 1995. Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82 (1-4), 227-244.

## **INFLUENCE OF SOLAR RADIATION ON HEAT CONSUMPTION IN FILM TUNNEL**

### **Summary**

The paper was aimed at determining the effect of solar radiation intensity on heat consumption. As a result of the analysis carried out, the coefficient was developed, which allows to take a note of the changes in conversion intensity of solar radiation in the function of ambience parameters. Based on the research made, a nomogram was developed which allows to estimate heat flux delivered to the heating system of the tunnel being heated, depending on the temperature differential and existing solar radiation.

**Key words:** solar radiation, heat consumption, film tunnel