

*Sławomir Kurpaska, Maciej Sporysz  
Katedra Inżynierii Rolniczej i Informatyki  
Akademia Rolnicza w Krakowie*

## WPLYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA INTENSYWNOŚĆ WYMIANY CIEPŁA W OGRZEWANYM TUNELU FOLIOWYM

### Streszczenie

W pracy zbadano wpływ wyposażenia ogrzewanego tunelu foliowego oraz różnicy temperatury między czynnikiem grzejnym a powietrzem wewnątrz obiektu na intensywność wymiany ciepła. Do analizy wykorzystano dane monitorowane przez system pomiarowy z tunelu zlokalizowanego na Akademii Rolniczej w Krakowie. Uzyskane wyniki badań pozwoliły określić wpływ wyposażenia dodatkowego na intensywność wymiany ciepła, a w konsekwencji na wymaganą powierzchnię grzewczą systemu grzejnego

**Słowa kluczowe:** tunel foliowy, ekran cieplny, ekran zagrzejnikowy, strumień ciepła, współczynnik wymiany ciepła

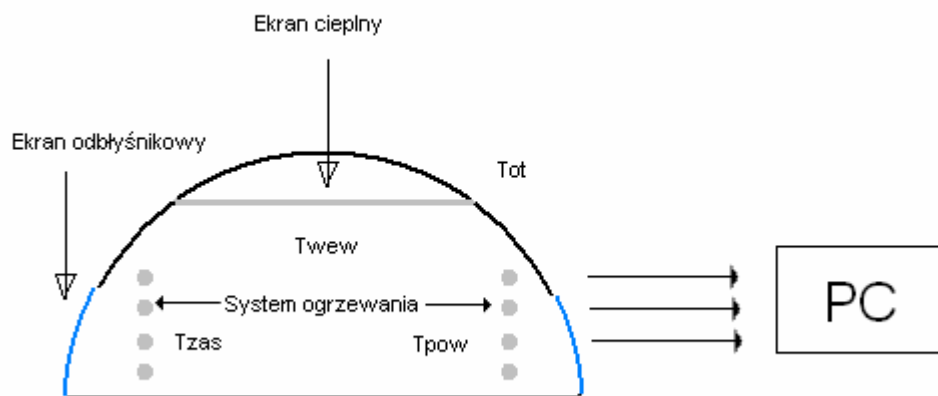
### Wstęp

Stale rosnące koszty energii wykorzystywanej do ogrzewania obiektów szklarniowych wymuszają działania mające na celu, z jednej strony ograniczenie strat ciepła, a z drugiej bardziej efektywne wykorzystanie jego źródeł. Opłacalność produkcji możemy podnieść m.in. poprzez odpowiedni dobór powierzchni grzejników, czy też racjonalne sterowanie parametrami fizycznymi wody grzejnej. Kolejnym ważnym czynnikiem jest wyposażenie tunelów foliowych. Zastosowane rozwiązania techniczne mają istotny wpływ na intensywność wymiany ciepła pomiędzy powierzchnią grzejników a otoczeniem. Montaż takich urządzeń jak ekrany zagrzejnikowe czy cieplne, znacząco zmienia intensywność wymiany ciepła między grzejnikami a osłoną obiektu. Stosowanie nowoczesnych wariantów konstrukcyjnych, nowych pokryć osłon prowadzi w konsekwencji do ograniczenia wydatków na energię i poprawia konkurencyjność zakładów zajmujących się uprawami pod osłonami. W pracy [Critten, Bailey 2002] autorzy przedstawili przegląd różnorodnych rozwiązań wprowadzanych do techniki grzewczej w szklarniach w latach 90-tych ubiegłego wieku. Kowalewski i Uziak [1993] dobierali nastawy regulatora

do sterowania temperatura wody grzejnej w szklarni. Z kolei Titel i in. [1996] badali wpływ zmiennej temperatury wody grzejnej na intensywność wymiany ciepła w szklarni. Zwart [1996] analizował zagadnienie wymiany ciepła między szklarnią (o zróżnicowanym wyposażeniu), a otoczeniem określając w konkluzji ilościowe zmiany w zużyciu ciepła. W pracy [Kurpaska 2003] określono ilościowe zmiany w zużyciu ciepła w zależności od wyposażenia technicznego tunelu foliowego. Określenie na drodze teoretycznych rozważań ilościowych zmian między zapotrzebowaniem ciepła (a w konsekwencji wymaganą powierzchnią grzewczą systemu grzejnego) a warunkami klimatu (wewnątrz i na zewnątrz obiektu) jest obarczone trudno do oszacowania błędem. Stąd określenie intensywności wymiany ciepła między powierzchniami grzejnymi a powietrzem wewnątrz będzie głównym celem prezentowanej pracy.

### Material i metoda

Badania przeprowadzono w tunelu doświadczalnym zlokalizowanym na terenie Wydziału Agrotechnologii AR w Krakowie. Analizowany obiekt przedstawiony został schematycznie na rys. 1. Jego powierzchnia wynosiła  $54 \text{ m}^2$ , zaś powierzchnia grzejników  $18,5 \text{ m}^2$ . Więcej informacji związanej z budową, wyposażeniem technicznym można znaleźć w pracy [Kurpaska i in. 2004].



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego wraz z przyjętymi oznaczeniami

Fig. 1. Diagram of the test bench with adopted denotations

W pracy wykorzystano dane zarchiwizowane przez automatyczny system monitorowania zainstalowany w badanym tunelu doświadczalnym. Pomiarów dokonywano w standardowym tunelu foliowym, a także w tunelu z dodatkowym wyposażeniem,

tzn. z zamontowanym za grzejnikami ekranem odbłyśnikowym, zbudowanym ze spienionego polistyrenu grubości 4 mm (wewnętrzna strona pokryta była warstwą aluminiowaną), wraz z ekranem nagrzejnikowym zainstalowano na wysokości 2 m ekran cieplny składający się naprzemiennie z tkaniny oraz pasków folii aluminiowej w proporcji 1:1.

Strumień ciepła dostarczony przez powierzchnię grzejnika do wnętrza tunelu foliowego można przedstawić za pomocą równania:

$$q = m_w \cdot c_w \cdot (T_{zas} - T_{pow}) \quad (1)$$

Z drugiej strony, strumień ciepła przekazywany przez ścianki grzejnika do otoczenia można zapisać jako [Orzechowski i in. 1997]:

$$q = q_{grz} = k_{grz} \cdot F_{grz} \cdot (\bar{T}_{grz} - T_{wew}) \quad (2)$$

gdzie:

$m_w$  – masa wody płynącej w przewodach grzejnych w jednostce czasu [kg/s],

$c_w$  – ciepło właściwe wody [J/kgK],

$T_{zas}$  – temperatura wody zasilającej grzejnik [°C],

$T_{pow}$  – temperatura wody opuszczającej grzejnik [°C],

$k_{grz}$  – współczynnik wnikania ciepła [W/m<sup>2</sup>K],

$F_{grz}$  – powierzchnia grzejnika [m<sup>2</sup>],

$\bar{T}_{grz}$  – średnia temperatura grzejnika  $\left( \bar{T}_{grz} = \frac{T_{zas} - T_{pow}}{2} \right)$  [°C],

$T_{wew}$  – temperatura we wnętrzu tunelu foliowego [°C],

Ponieważ strumienie te w analizowanym przypadku są identyczne, porównując obydwa równania, możemy wyznaczyć współczynnik wnikania ciepła grzejników, który wynosi:

$$k_{grz} = \frac{m_w \cdot c_w \cdot (T_{zas} - T_{pow})}{F_{grz} \cdot (\bar{T}_{grz} - T_{wew})} \quad (3)$$

Dokładność z jaką wykonano obliczenia została oszacowana za pomocą różniczki zupełnej. Ponieważ wartościami bezpośrednio mierzonymi w doświadczeniach były: masa czynnika w instalacji grzejnej ( $m_w$ ) temperatura zasilania ( $T_{zas}$ ), temperatura powrotu ( $T_{pow}$ ) oraz temperatura wewnętrzna ( $T_{wew}$ ), zatem błąd bezwzględny ma postać:

$$|\Delta k_{grz}| = \left| \frac{\partial k_{grz}}{\partial m_w} \right| \cdot |\Delta m_w| + \left| \frac{\partial k_{grz}}{\partial T_{zas}} \right| \cdot |\Delta T_{zas}| + \left| \frac{\partial k_{grz}}{\partial T_{pow}} \right| \cdot |\Delta T_{pow}| + \left| \frac{\partial k_{grz}}{\partial T_{wew}} \right| \cdot |\Delta T_{wew}| \quad (4)$$

Po zróżniczkowaniu zależności (3) otrzymujemy kolejno:

$$\frac{\partial k_{grz}}{\partial m_w} = \frac{c_w \cdot (T_{zas} - T_{pow})}{F_{grz} \cdot (\bar{T} - T_{wew})} \quad (5a)$$

$$\frac{\partial k_{grz}}{\partial T_{zas}} = \frac{m_w c_w}{F_{grz} (\bar{T} - T_{wew})^2} (T_{pow} - T_{wew}) \quad (5b)$$

$$\frac{\partial k_{grz}}{\partial T_{pow}} = \frac{m_w c_w}{F_{grz} (\bar{T} - T_{wew})^2} (T_{wew} - T_{zas}) \quad (5c)$$

$$\frac{\partial k_{grz}}{\partial T_{wew}} = \frac{m_w c_w}{F_{grz} (\bar{T} - T_{wew})^2} (T_{zas} - T_{pow}) \quad (5d)$$

po wykonaniu odpowiednich przekształceń równanie (4) można więc zapisać jako:

$$|\Delta k_{grz}| = \left| \frac{m_w c_w}{F_{grz} (\bar{T} - T_{wew})^2} \right| \left( |T_{pow} - T_{wew}| |\Delta T_{zas}| + |T_{wew} - T_{zas}| |\Delta T_{pow}| + |T_{zas} - T_{pow}| |\Delta T_{wew}| \right) \quad (8)$$

## Wyniki i dyskusja

Maksymalny błąd względny (obliczony dla najbardziej niekorzystnego przypadku tzn. wtedy kiedy wszystkie błędy cząstkowe sumują się) i mieścił się w granicach 5–7%.

Do szczegółowej analizy w pracy zamieszczono dane z kilku okresów różniących się między sobą warunkami klimatycznymi. Dla przypadku, kiedy tunel foliowy był bez dodatkowego wyposażenia technicznego, zmienne decyzyjne mieściły się w następującym zakresie:

$$9,5 \leq t_{wew} \leq 12,1, 16,2 \leq t_{zas} \leq 54,1, 15,4 \leq t_{pow} \leq 35,9$$

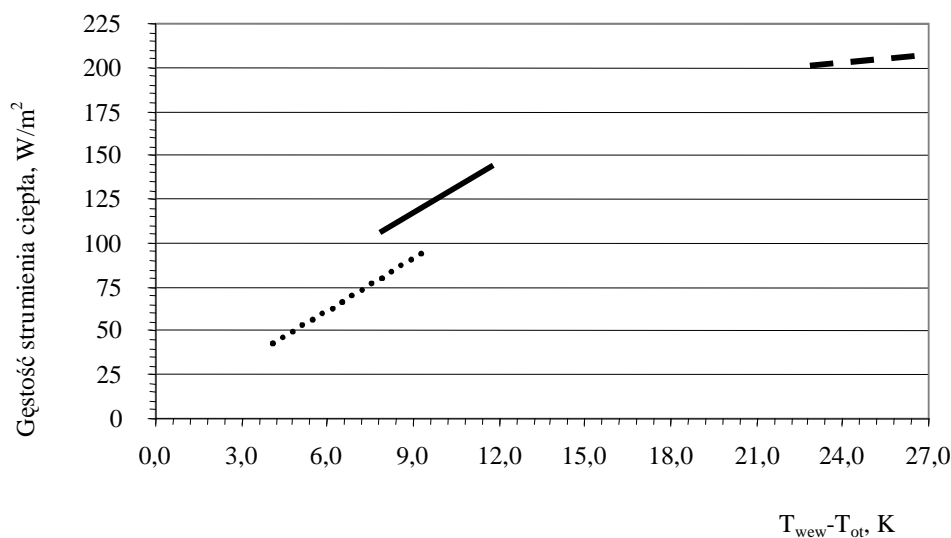
Badania, gdzie w obiekcie zainstalowano dodatkowy ekran nagrzejnikowy (który odbija ciepło emitowane przez grzejnik do wnętrza tunelu) charakteryzował się w następujących przedziałach zmienności mierzonych parametrów:

$$9,3 \leq t_{wew} \leq 12,3, 18,7 \leq t_{zas} \leq 53,3, 14,4 \leq t_{pow} \leq 24,9$$

Z kolei, podczas badań w których w obiekcie zainstalowano zarówno ekran nagrzejnikowy jak i ekran ciepła zmierzone parametry kształtowały się w następujących zakresach:

$$6,2 \leq t_{wew} \leq 8,7, 46,2 \leq t_{zas} \leq 54,8, 35,5 \leq t_{pow} \leq 46,2.$$

W każdym z opisywanych przypadków wydatek wody grzejnej był na poziomie 14,47 l/min, czyli 0,24 kg/s. Na rys. 2 przedstawiono zależność zużycia ciepła od różnicy pomiędzy temperaturą otoczenia a temperaturą wewnątrz dla obiektów z różnym wyposażeniem dodatkowym.

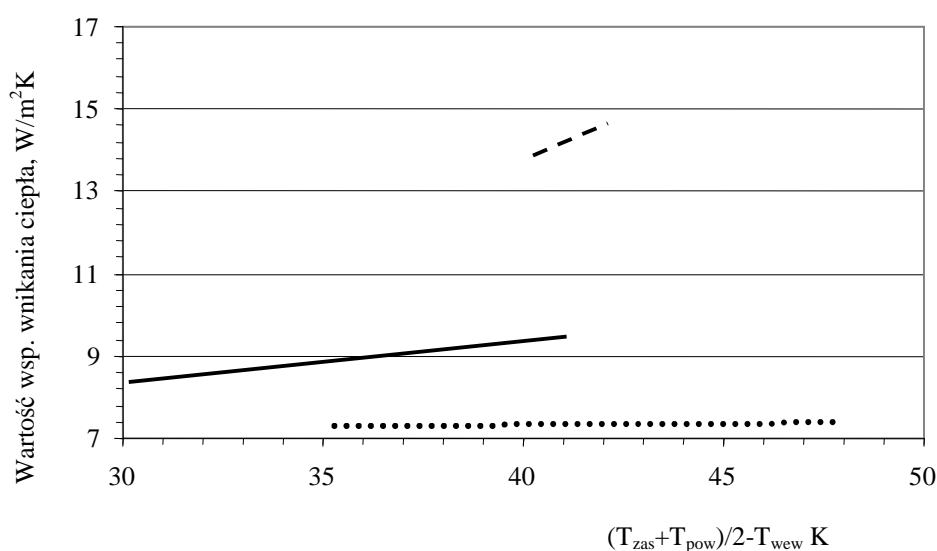


Rys. 2. Gęstość zużycia ciepła w funkcji różnicy temperatury dla zróżnicowanego wyposażenia tunelu ..... tunel standardowy — tunel z ekranem nagrzejnikowym — — — tunel z ekranem nagrzejnikowym i ekranem ciepła

Fig. 2. Heat consumption density as a function of temperature difference for various tunnel outfit ..... standard tunnel — tunnel with thermal screen — — — tunnel with thermal screen and heat screen

Zauważyć można, iż największe zużycie ciepła notowane jest w standardowym obiekcie. Zastosowanie ekranu zagrzejnikowego i cieplnego powoduje znaczące zmniejszenie gęstości strumienia ciepła. Ma to istotny wpływ na ograniczenie kosztów związanych z funkcjonowaniem obiektu zarówno na etapie budowy (powierzchnia przewodów grzejnych), zużycia paliwa jak i możliwości regulacji temperatury wody grzejnej.

Na rys. 3 przedstawiony został wpływ różnicy pomiędzy średnią temperaturą grzejnika a temperaturą wewnątrz obiektu na wartość współczynnika wnikania ciepła (wyliczonego z równania 3) przy zróżnicowanym wyposażeniu dodatkowym tunelu foliowego. Można zauważyć, iż największy wzrost współczynnika wnikania ciepła, przy identycznym wzroście różnicy temperatur notuje się w przypadku tunelu foliowego z zamontowanymi ekranami cieplnym i zagrzejnikowymi, zaś najmniejszy w przypadku obiektu standardowego.



Rys. 3. Wartość współczynnika wnikania ciepła w funkcji różnicy temperatury dla zróżnicowanego wyposażenia tunelu: ..... tunel standardowy, — tunel z ekranem zagrzejnikowym, - - - tunel z ekranem zagrzejnikowym i ekranem ciepła

Fig. 3. Value of convective heat-transfer coefficient as a function of temperature difference for various tunnel outfit

W tabeli 1 przedstawiono minimalne i maksymalne wartości współczynnika wnikania ciepła oraz gęstości strumienia ciepła uzyskane podczas eksperymentu.

*Tabela 1. Minimalne i maksymalne wartości współczynnika wnikania ciepła ( $k_{grz}$ ) i gęstości strumienia ciepła ( $q$ ) w rozpatrywanych tunelu foliowym*  
*Table 1. Minimum and maximum values of convective heat-transfer coefficient ( $k_{grz}$ ) and heat flux density ( $q$ ) in the analyzed foil tunnel*

Tunel:	k [W/m <sup>2</sup> K]		q [W/m <sup>2</sup> ]	
	MIN	MAX	MIN	MAX
Standardowy	7,3	7,5	41	92
Standardowy z ekr. zagrz.	8,2	9,5	109	155
Standardowy z ekr. zagrz. i ciepl.	13,7	14,7	180	215

Analizując te dane można zauważyć, że średnia wartość współczynnika ciepła (w badanym zakresie warunków doświadczenia) w porównaniu dla wartości współczynnika wyznaczonego dla tunelu standardowego, jest większa od 25% (tunel z ekranem zagrzewnikowym) do 87% (tunel z ekranami zagrzewnikowym i cieplnym). Błąd bezwzględny obliczenia współczynnika wymiany ciepła w rozpatrywanych tunelach foliowych nie przekraczał 1 [W/m<sup>2</sup>K], zaś błąd względny mieścił się na poziomie 5-7 [%].

### Wnioski

1. W badanym zakresie różnic temperatur pomiędzy otoczeniem a wnętrzem tunelu, gęstość strumienia strat ciepła mieściła się od 41 do 92 (tunel standardowy), w tunelu z ekranem zagrzewnikowym mieściła się w przedziale od 109 do 155, zaś w tunelu z ekranem zagrzewnikowym i ekranem ciepła od 180 do 215 [W/m<sup>2</sup>].
2. Średnia wartość współczynnika wnikania ciepła w porównaniu do tunelu standardowego jest większa od 25% (tunel z ekranem zagrzewnikowym) do 87% (tunel z ekranami zagrzewnikowym i cieplnym).
3. Błąd bezwzględny obliczenia współczynnika wymiany ciepła w rozpatrywanych tunelach foliowych nie przekraczał 1 [W/m<sup>2</sup>K], zaś błąd względny mieścił się w granicach 5-7%.

### Bibliografia

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

Kowalewski P., Uziak J. 1993. Układ regulacji temperatury szklarni- dobór nastaw regulatora. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 2; 109-115.

Kurpaska S. 2003. Modyfikacja wyposażenia technicznego tunelu foliowego w aspekcie jego zapotrzebowania ciepła. *Problemy Inżynierii Rolnictwa*, 1, 39-45.

Kurpaska S., Latała H., Michałek R., Rutkowski K. 2004. Funkcjonalność zintegrowanego systemu grzewczego w ogrzewanych tunelach foliowych. PTIR, Kraków.

Orzechowski Z., Prywer J., Zarzycki R. 1997. *Mechanika płynów w inżynierii środowiska*. WNT, Warszawa.

Teitel M., Shklyar A., Regal I., Barak M. 1996. Effects of nonsteady hot – water greenhouse heating on heat transfer and microclimate. *J. Agr. Eng. Res.* 65, 297-304.

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. Zwart de H.F. 1996: Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD, Wageningen

## **EFFECT OF SELECTED FACTORS ON HEAT EXCHANGE INTENSITY IN THE HEATED FOIL TUNNEL**

### **Summary**

The work includes a study of the effect of the outfit of the heated foil tunnel and difference in temperature between heating medium and air inside the object on heat exchange intensity. For the analysis the data monitored by the measuring system in the tunnel located at the Academy of Agriculture in Krakow was used. The results obtained from the analysis allowed to determine the effect of additional equipment on heat exchange intensity, and in consequence on the required heating area of the heating system

**Key words:** foil tunnel, heat screen, thermal screen, heat flux, heat transfer coefficient