

ZASTOSOWANIE TERMOWIZJI DO BADAŃ ROZKŁADU TEMPERATURY W TUNELACH FOLIOWYCH WYPOSAŻONYCH W AKUMULATORY CIEPŁA*

Robert Sabat, Paweł Konopacki, Ryszard Hołownicki
Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach

Sławomir Kurpaska, Hubert Latała
Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie

Streszczenie. Celem prowadzonych badań była ocena możliwości zastosowania termowizji jako metody pomiaru temperatury w uprawach pod osłonami. Użyte metody zobrazowań termalnych umożliwiły wykazanie różnic temperatur między badanymi obiektami uprawowymi. Pozwoliły także na szybkie ustalenie gradientu temperatur w tunelach foliowych bez konieczności instalacji dużej liczby czujników temperatury. Dzięki metodom termograficznym było możliwe zaobserwowanie zjawiska konwekcyjnego przenikania ciepła ze złoża kamiennego akumulatora do wnętrza tunelu. Uzyskane wyniki sugerują dużą przydatność technik termograficznych do rejestrowania warunków termicznych, panujących w uprawach pod osłonami.

Słowa kluczowe: termowizja, termografia, kamera termowizyjna, tunel foliowy, uprawy pod osłonami, akumulator ciepła

Wstęp

Termografia, jako bezinwazyjna metoda badania rozkładu temperatury powierzchni ciał, znajduje coraz więcej zastosowań w badaniach rolniczych (Walczak i in., 2003). Wykorzystuje się ją na przykład w fizjologii roślin do określania wpływu zasolenia spowodowanego wyższym stężeniem EC w podawanej pożywce (Urrestarazu, 2013) oraz do wykrywania chorób u roślin (Oerke i in., 2006; Baranowski i in., 2009). Dzięki termowizji istnieje możliwość wykrycia we wczesnych stadiach czynników zaburzających właściwy rozwój roślin. Stres wywołany zasoleniem bądź chorobą wpływa na prawidłowość procesu

* Publikacja współfinansowana przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

transpiracji, przez co zwiększa się temperatura roślin. Termografia potencjalnie może być również zastosowana do określania ewapotranspiracji rzeczywistej (Baranowski i in., 2005), wykrywania stresu wodnego roślin, spowodowanego brakiem dostępnej wody glebowej w strefie korzeniowej (Kaukoranta, 2005), oraz określania jakości owoców (Baranowski i in., 2012).

Rosnące ceny paliw kopalnych oraz ograniczenia prawne wprowadzone przez UE stały się impulsem do poszukiwania alternatywnych sposobów dogrzewania upraw pod osłonami. W Instytucie Ogrodnictwa powstała koncepcja kamiennego akumulatora ciepła opisana przez Hołownickiego i in. (2012). Z kolei Konopacki i in. (2012) przedstawili w swoich badaniach możliwość magazynowania nadwyżek ciepła podczas procesu ładowania akumulatora kamiennego w dzień i dostarczania go do wnętrza obiektu w nocy, co skutkowało wzrostem temperatury w tunelu o co najmniej $1,5^{\circ}\text{C}$. W doświadczeniach uprawowych pod osłonami konieczna jest identyfikacja miejsc o niższej temperaturze, w których można oczekiwać niższych plonów przy zwiększonej wilgotności wywołującej choroby grzybowe u roślin. Kempkes i in. (2000) wykazali wpływ usytuowania rur grzewczych na różnice w pionowym rozkładzie temperatury powietrza. Pomiary temperatury w uprawach pod osłonami wymagają znacznej liczby czujników. Balendonck i in. (2010) wykazali, że do określenia różnic w przestrzennym rozkładzie temperatury potrzeba nie mniej niż 9 czujników na hektar (rozstawa $33 \times 33 \text{ m}^2$).

Celem prowadzonych badań była ocena możliwości zastosowania termowizji jako szybkiej metody pomiaru temperatury w uprawach pod osłonami. Prezentowane dane stanowią wstępny etap badań nad zastosowaniem termowizji w badaniach rolniczych, jako metody określania rozkładu temperatur w badanych obiektach i wykrywania nieszczelności w konstrukcji. Użycie termowizji ułatwi również dostosowywanie systemów ogrzewania i wentylacji, aby poprawić jednorodność warunków uprawowych pod osłonami.

Metodyka

Badania przeprowadzono w Instytucie Ogrodnictwa w Skierniewicach w czterech tunelach foliowych ($30 \times 9 \text{ m}$). W pierwszych dwóch tunelach zainstalowano po dwa akumulatory ciepła ze złożem kamiennym, natomiast kolejne dwa tunele były tunelami kontrolnymi. W tunelu pierwszym i trzecim uprawiano ogórki, a w tunelu drugim i czwartym pomidory.

Do badań zastosowano kamerę termowizyjną marki Flir model P620, która wyposażona jest w niechłodzony, długofalowy detektor mikrobolometryczny działający w paśmie dalekiej podczerwieni od $7,5$ do $13 \mu\text{m}$, o rzeczywistej liczbie pikseli w obrazie 640×480 i czułości termicznej NETD 40 mK dla jednej ramki, z częstotliwością odświeżania ramki 30 Hz . Zakres pomiarowy kamery wynosi od -40°C do 500°C .

Porównanie temperatur pomiędzy tunelami

Do pomiaru temperatur wybrano prawe części ścian szczytowych tuneli (rys. 1), ponieważ po lewej stronie znajdują się elektryczne szafy rozdzielcze oraz szafy służące do sterowania klimatem w tunelach, które mogły zakłócać pomiary temperatury.

Uzyskane z termogramu wartości temperatury (maksymalną – T_{Tmax} , minimalną – T_{Tmin} , oraz średnią $T_{T\text{śred}}$) porównano z odczytami tradycyjnych czujników temperatury umiesz-

czonych w centralnych częściach tuneli. Układ pomiarowy składał się z czujników Pt1000 podłączonych do systemu sterowania pracą akumulatorów KSP (firmy DKR-Elektronik, Krzeszowice) (T_{KSP}).



Rysunek 1. Termogram panoramiczny ścian szczytowych tuneli z zaznaczonymi obszarami pomiarowymi (zdjęcie panoramiczne w odległości 6 m od tuneli)
Figure 1. A panoramic thermal image of the gable ends of tunnels with marked measurement areas (panoramic image at the distance 6 m from tunnels)

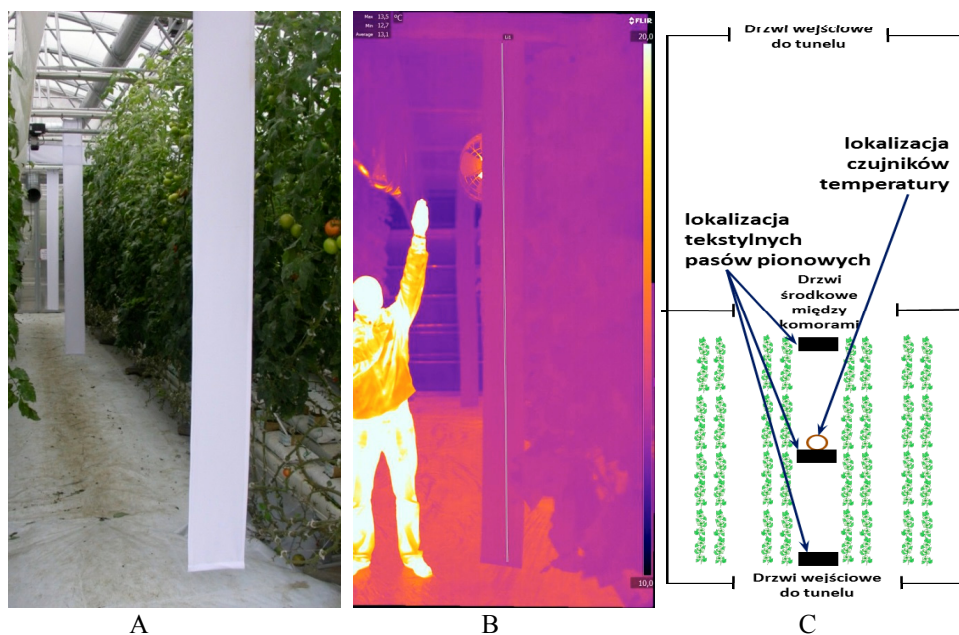
Gradient temperatur wewnątrz tuneli

W celu określenia rozkładu temperatury w tunelach, w środkowych przejściach każdego z nich zainstalowano po trzy tekstylne pasy pionowe (rys. 2A), każdy o wysokości 3 m, w odległości 2, 8 i 14 m od drzwi wejściowych. Takie pasy są zalecane przez producentów kamer termowizyjnych do pomiarów rozkładów temperatur, gdyż eliminują wpływ przewodnictwa ciepła, które zaburza pomiar, gdy w sąsiedztwie znajdują się metalowe elementy konstrukcyjne oraz gdy występuje oziębianie się powierzchni liści w skutek transpiracji. Wykonano panoramiczne zdjęcia termowizyjne pasów i przez środek poprowadzono linie pomiarowe (rys. 2B). Linie pomiarowe zostały podzielone na 10 równych części, a dla każdej z nich obliczono średnią wartość temperatury.

Wpływ temperatury wewnątrz złoża akumulatora na temperaturę na jego powierzchni

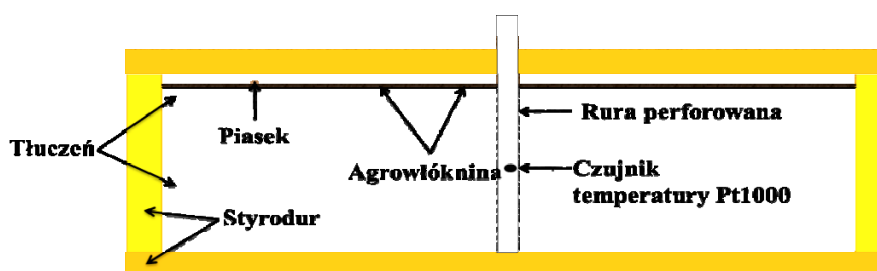
Wykonano zdjęcia termowizyjne powierzchni podłoża tunelu nad akumulatorami, przy jednoczesnej rejestracji temperatury złoża kamiennego przy użyciu umieszczonego w połowie głębokości złoża czujnika Pt1000 (rys. 3). Ze względu na stwierdzoną wcześniej wysoką powtarzalność pomiarów i szybko zachodzące zmiany temperatury pomiary te wykonywano dwukrotnie. Podczas pierwszego pomiaru wykorzystano dwa, a za drugim razem – wszystkie cztery akumulatory. Zdjęcia termowizyjne powierzchni podłoża wykonano w dwóch miejscach odległych od siebie o około 2 m, bowiem pomiary bezpośrednio nad czujnikiem Pt1000 były ze względów technicznych niemożliwe.

Analizę regresji oraz wykresy powierzchniowe wykonano w programie Statistica 10 (StatSoft, Inc., 2011).



Rysunek 2. Obraz w świetle widzialnym (A), termogram pasów pionowych wykorzystanych do określenia rozkładu temperatur w tunelach (B) oraz lokalizacja pasów i czujników temperatury (C)

Figure 2. Image in the visible light (A), thermal image of vertical belts used for determination of temperature distribution in tunnels (B) and localization of passes and temperature sensors (C)



Rysunek 3. Schemat kamiennego akumulatora z rurą perforowaną, w której umieszczono czujnik temperatury Pt1000

Figure 3. Schematic representation of a stone accumulator with a perforated pipe, where a temperature sensor Pt1000 was placed

Wyniki i omówienie

W wyznaczonych obszarach na termogramach ścian szczytowych tuneli liczba pikseli pomiarowych wynosiła od 20000 do 108000. Widoczne na termogramie (rys. 1) różnice w barwie między tunelami z akumulatorami (nr 1 i 2) a tunelami kontrolnymi (nr 3 i 4) wskazują na różne poziomy temperatur zewnętrznej warstwy pokrycia tuneli. Otrzymane wyniki temperatury z termogramów zestawiono z wynikami pomiarów czujnikami T_{KSP} (podłączonymi do systemu sterowania pracą akumulatorów KSP) znajdującymi się w środku komór uprawowych na wysokości 1,5 m od podłoża (tab. 1).

Tabela 1

Temperatura zewnętrznego pokrycia tuneli odczytana z termogramów (maksymalna – T_{Tmax} , minimalna – T_{Tmin} , średnia – $T_{Tśred}$) i temperatura zarejestrowana wewnątrz tuneli (czujnikami podłączonymi do systemu sterowania pracą akumulatorów – T_{KSP})

Table 1

Temperature of the outer covering of a tunnel read out from thermal images (maximum – T_{Tmax} , minimum – T_{Tmin} , average – $T_{Tśred}$) and temperature registered inside tunnels (with sensors connected to the control system with accumulators' operation – T_{KSP})

Nr tunelu	T_{Tmax} (°C)	T_{Tmin} (°C)	$T_{Tśred}$ (°C)	T_{KSP} (°C)
1	9,98	8,96	9,44	15,24
2	9,89	8,65	9,31	14,58
3	8,41	7,75	8,08	11,93
4	8,58	7,78	8,17	11,9
różnice 1-3	1,57	1,21	1,36	3,31
różnice 2-4	1,31	0,87	1,14	2,68

Ze względu na różne gatunki uprawianych warzyw porównano między sobą tunele 1 i 3, w których uprawiano ogórki, oraz tunele 2 i 4, w których uprawiano pomidory. Różnice temperatury zewnętrznej warstwy folii między tunelami, w których uprawiano ogórki, były większe niż w przypadku tuneli, w których rosły pomidory (niezależnie czy porównywano temperatury maksymalne T_{Tmax} , minimalne T_{Tmin} czy średnie $T_{Tśred}$). Różnice te były proporcjonalne do różnic temperatury wewnątrz tunelu zmierzonych czujnikami podłączonymi do systemu sterowania pracą akumulatorów (T_{KSP}). Stwierdzone różnice w wartościach temperatury między czujnikami T_{KSP} zainstalowanymi w środku tunelu a odczytami z termogramu (tab. 2), wskazują na znaczny gradient temperatur w tunelach zarówno tych wyposażonych w akumulatory ciepła, jak i kontrolnych.

W tunelach, w których zastosowano kamienny akumulator ciepła, różnice temperatury były znacznie wyższe, co było spowodowane rozładowywaniem złoża w cyklu nocnym i podgrzewaniem roślin, a w następstwie wzrostem temperatury w tunelach. W tunelach kontrolnych, gdzie nie podgrzewano roślin ciepłem z akumulatora, różnice są mniejsze.

Do zobrazowania rozkładu temperatur wewnątrz tuneli posłużyły pomiary termowizyjne pionowych pasów tekstylnych i wykonane na ich podstawie wykresy powierzchniowe. Największe różnice zaobserwowano między tunelami 1 i 3 (rys. 4 i 5). Stwierdzono, że najniższa temperatura panuje przy drzwiach wejściowych zarówno w tunelu 1 (rys. 4), jak

i w tunelu 3 (rys. 5). Przyczyną są prawdopodobnie nieszczelności w drzwiach wejściowych do tuneli widoczne również na termogramie ścian szczytowych tuneli (rys. 1). W tunelu 1 zaobserwowano radiacyjne przenikanie ciepła z akumulatora kamiennego do wnętrza tunelu. W tunelu kontrolnym również zaobserwowano wpływ podłoża na temperaturę powietrza. Jednak w tym przypadku był to efekt negatywny (najniższą temperaturę zarejestrowano przy podłożu), co wskazuje na straty ciepłe z obiektu do podłoża.

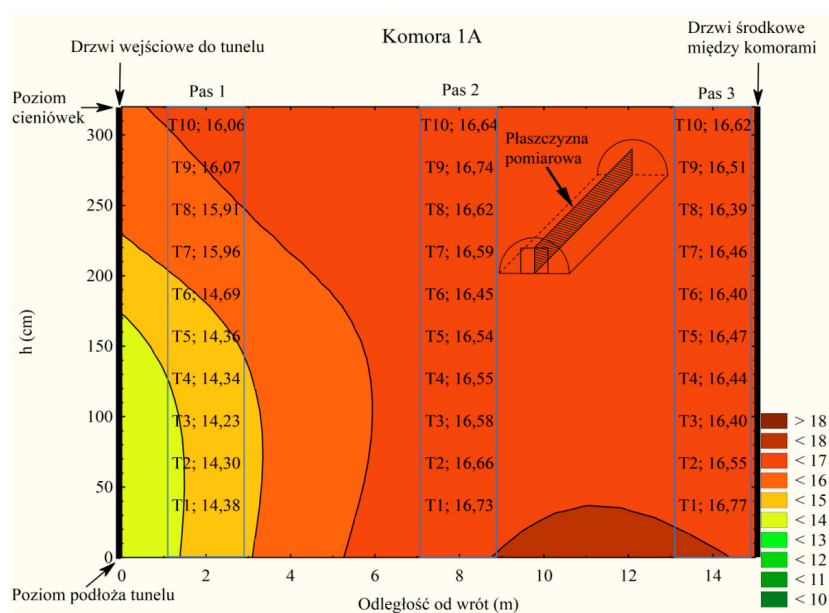
Tabela 2

Różnice temperatur mierzone czujnikami (T_{KSP}) umieszczonymi w środku tunelu, a odczytami z termogramów pokrycia zewnętrznego tuneli (T_{Tmax} , T_{Tmin} , $T_{Tśred}$)

Table 2

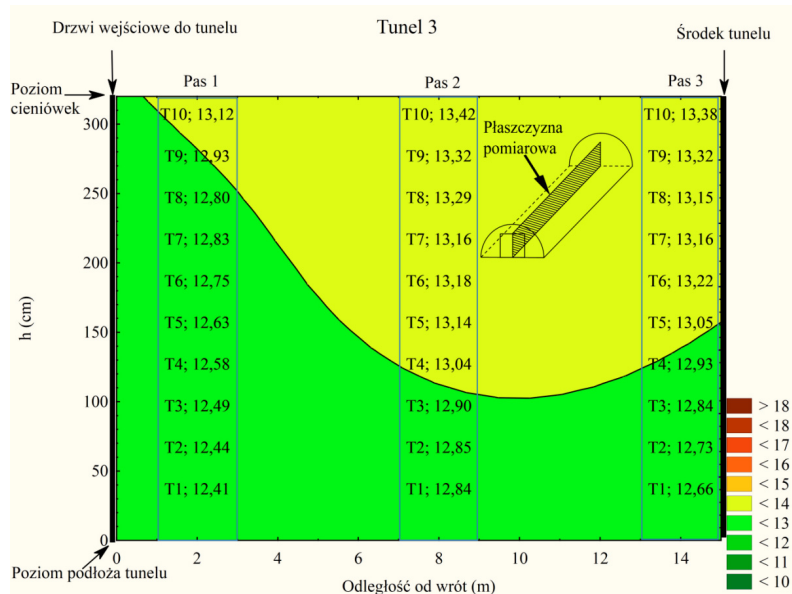
Differences in temperatures measured with sensors (T_{KSP}) located inside the tunnel and read outs from thermal images of the outer covering of tunnels (T_{Tmax} , T_{Tmin} , $T_{Tśred}$)

Nr tunelu	$T_{KSP} - T_{Tmax}$ (°C)	$T_{KSP} - T_{Tmin}$ (°C)	$T_{KSP} - T_{Tśred}$ (°C)
1	5,26	6,28	5,80
2	4,69	5,93	5,27
3	3,52	4,18	3,85
4	3,32	4,12	3,73



Rysunek 4. Temperatury odczytane z termogramów pasów tekstylnych w tunelu 1 oraz wykonany na ich podstawie wykres powierzchniowy

Figure 4. Temperatures read out from thermal images of textile belts in tunnel 1 and a surface graph carried out based on them



Rysunek 5. Temperatury odczytane z termogramów pasów tekstylnych w tunelu 3 oraz wykonany na ich podstawie wykres powierzchniowy
 Figure 5. Temperatures read out from thermal images of textile belts in tunnel 3 and a surface graph carried out based on them

Wyniki pomiarów termowizyjnych powierzchni podłoża tuneli oraz odpowiadające im temperatury złoża kamiennego zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3

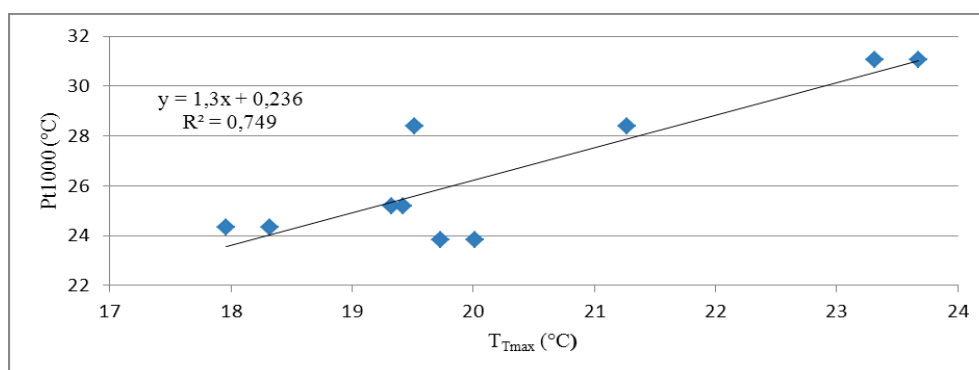
Zestawienie temperatur z odczytanych z termogramów powierzchni akumulatora i temperatur mierzonych czujnikami Pt1000 zainstalowanymi w środku złożów kamiennych

Table 3

The list of temperatures read out from thermal images of the accumulator surface and temperatures measured with Pt1000 sensors installed inside the stone beds

Data	T_{Tmax} (°C)	T_{Tmin} (°C)	$T_{Tśred}$ (°C)	Pt1000 (°C)
2012 V 28	18,32	16,46	17,30	24,34
2012 V 28	17,96	15,92	17,20	24,33
2012 VIII 09	23,67	22,13	22,78	31,07
2012 VIII 09	23,31	21,60	22,47	31,06
2012 VIII 09	21,27	18,83	19,62	28,38
2012 VIII 09	19,51	18,29	19,04	28,38
2012 VIII 09	19,73	18,22	19,03	23,85
2012 VIII 09	20,02	19,03	19,55	23,85
2012 VIII 09	19,33	17,88	18,78	25,19
2012 VIII 09	19,42	18,26	18,92	25,19

Zaobserwowane zjawisko konwekcyjnego przenikania ciepła potwierdzono, wykonując analizy regresji liniowej. Wykazano zależności pomiędzy wynikami pomiarów termowizyjnych (T_{Tmax} , T_{Tmin} , $T_{Tśred}$) a temperaturami w środku złoża (T_{KSP}). Stwierdzono, że wraz ze wzrostem temperatury w złożu akumulatora rośnie temperatura radiacyjna na powierzchni akumulatora, a najsilniejszą zależność stwierdzono pomiędzy temperaturą złoża a maksymalną temperaturą na powierzchni podłoża T_{Tmax} (rys. 6), dla której współczynnik korelacji wyniósł 0,866.



Rysunek 6. Zależność pomiędzy temperaturami maksymalnymi z termogramów a temperaturami zmierzonymi czujnikami Pt1000, zainstalowanymi w środku złoża akumulatorów
Figure 6. Relation between the maximum temperatures from thermal images and temperatures measured with Pt1000 sensors installed inside beds of accumulators

Podsumowanie

Ciepło ze złoża akumulatora kamiennego wprowadzane nocą do wnętrza tunelu spowodowało wzrost temperatury nie tylko ścian zewnętrznych tunelu, ale w całym przekroju wzdłużnym. Dzięki zastosowaniu kamery termowizyjnej stwierdzono, że w tunelach z akumulatorami ciepła występuje wyższa maksymalna temperatura zewnętrznej warstwy pokrycia ścian szczytowych o co najmniej $1,4^{\circ}\text{C}$ i wyższa temperatura w środkowej części tunelu o $3,4^{\circ}\text{C}$ w stosunku do tuneli kontrolnych. Połączenie termowizji i klasycznych czujników temperatury umożliwiło wykazanie przepływu ciepła z wnętrza złoża akumulatorów do wnętrza komór uprawowych.

Praktyczne zastosowanie termowizji w uprawach pod osłonami nie jest jeszcze do końca wykorzystane. Szczególnie obiecujące wydaje się zastosowanie termowizji przy badaniach zakresu zmian gradientu temperatur w tunelach oraz wpływu różnych czynników na zmianę rozkładu temperatur. Ze względu na bezinwazyjność oraz łatwość użycia kamery termowizyjnej narzędzie to wydaje się być wystarczająco precyzyjnym przyrządem do badania rozkładów temperatury wewnątrz obiektów uprawowych oraz na powierzchniach instalacji akumulatorów ciepła.

Literatura

- Balendonck, J.; Van Os, E. A.; Van der Schoor, R.; Van Tuijl, B. A. J.; Keizer, L. C. P. (2010). *Monitoring spatial and temporal distribution of temperature and relative humidity in greenhouses based on wireless sensor technology*. International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 2010, 443-452.
- Baranowski, P.; Usowicz, B.; Walczak, R.; Mazurek, W. (2005). *Evaporation into the boundary layer of the atmosphere*. Lublin, Institute of Agrophysics PAS, ISBN 83-87385-99-9.
- Baranowski, P.; Mazurek, W.; Jędrzycka, M.; Babula-Skowrońska, D. (2009). Zmiany temperatury liści rzepaku (*Brassica napus*) pod wpływem porażenia przez grzyby rodzaju *Alternaria*. *Rośliny Oleiste - Oilseed Crops*, 1, T. XXX, 21-34.
- Baranowski, P.; Mazurek, W.; Wozniak, J.; Majewska, U. (2012). Detection of early bruises in apples using hyperspectral data and thermal imaging. *Journal of Food Engineering*, 110, 345-355.
- Hołownicki, R.; Konopacki, P.; Kurpaska, S.; Latała, H.; Treder, W.; Nowak, J. (2012). Magazynowanie nadwyżek ciepła w tunelach foliowych - koncepcja akumulatora kamiennego. *Inżynieria Rolnicza* 2(136)T.1, 79-87.
- Kaukoranta, T.; Murto, J.; Takala, J.; Tahvonen, R. (2005). Detection of water deficit in greenhouse cucumber by infrared thermography and reference surfaces. *Scientia Horticulturae*, 106, 447-463.
- Kempkes, F. L. K.; Van de Braak, N. J.; Bakker, J. C. (2000). Effect of Heating System Position on Vertical Distribution of Crop Temperature and Transpiration in Greenhouse Tomatoes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75, 57-64.
- Konopacki, P.; Hołownicki, R.; Sabat, R.; Kurpaska, S.; Latała, H. (2012). Magazynowanie ciepła w akumulatorze kamiennym. *Inżynieria Rolnicza* 2(137)T.2, 113-121.
- Nijs, L. (1997). *Handleiding voor het opsporen en oplossen van horizontale klimaatverschillen (research report 112)*. Aalsmeer/Naaldwijk (NL): Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente. Pozyskano z: <http://library.wur.nl/WebQuery/primo/fullcat/971414>
- Oerke, E-C.; Steiner, U.; Dehne, H-W.; Lindenthal, M. (2006). Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions. *Journal of Experimental Botany*, 57(9), 2121-2132.
- Urrestarazu, M. (2013). Infrared thermography used to diagnose the effects of salinity in a soilless culture. Quantitative InfraRed Thermography, doi: 10.1080/17686733.2013.763471.
- Walczak, R.; Mazurek, W.; Baranowski, P. (2003). Termografia w agrofizyce. *Acta Agrophysica*, 2(3), 663-675.
- Wysocka-Owczarek, M. (2001). *Pomidory pod osłonami*. Warszawa, Hortpress, ISBN 83-86384-84-0.

THE USE OF THERMOVISION IN THE STUDY OF THERMAL DISTRIBUTION WITHIN THE PLASTIC TUNNELS EQUIPPED WITH HEAT ACCUMULATORS

Abstract. The objective of this study was to evaluate the possibility of applying thermovision as a method for measuring the temperature of crops under cover. The thermal imaging methods allowed demonstration of temperature differences between the investigated ~~crop~~ objects. They also enabled quick determination of the temperature gradient in plastic tunnels without a need for installation of a large number of standard temperature sensors. Moreover, the thermographic method allowed the observation of the phenomenon of convective heat transfer from the bed of the stone accumulator into the tunnel. The results suggest that thermography is a very useful technique for recording thermal conditions of crops under cover.

Key words: thermovision, thermography, ~~thermal imaging~~ infrared camera, plastic tunnel, crops under cover, heat accumulator

Adres do korespondencji:

Robert Sabat; e-mail: Robert.Sabat@inhort.pl
Instytut Ogrodnictwa w Skierniewicach
ul. Konstytucji 3 Maja 1/3
96-100 Skierniewice