

WYKORZYSTANIE ANALIZY WYMIAROWEJ DO BADANIA ZAGADNIENÍ PRZEPEŁYWU CIEPŁA W OGRZEWANYM PODŁOŻU

Sławomir Kurpaska

Katedra Mechanizacji Rolnictwa, Akademia Rolnicza, ul. Balicka 104, 30-149 Kraków
e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań zagadnień cieplnych w ogrzewanym przy pomocy przewodów grzejnych podłożu ogrodniczym. Analizę wpływu zmiennych decyzyjnych (temperatura wody grzejnej, temperatura otoczenia, wilgotność podłoża, głębokość umieszczenia w podłożu przewodów grzejnych) na kształtowanie się temperatury w podłożu przeprowadzono wykorzystując metodę analizy wymiarowej. Stosując procedurę tej analizy wyprowadzono dwa kryteria podobieństwa, określając zakres stosowania otrzymanych wyników do wykorzystania w innych obiektach. Określono również gęstość strumienia ciepła niezbędnego do ogrzewania podłoża.

Słowa kluczowe: podłoże ogrodnicze, ogrzewanie, analiza wymiarowa

WSTĘP

W produkcji roślin pod osłonami istotnym problemem jest minimalizacja ilości ciepła niezbędnego do ogrzewania obiektu. Ciepło dostarczane do obiektu wykorzystywane jest nie tylko do utrzymania wymaganej temperatury powietrza ale również i do ogrzewania podłoża. We współcześnie użytkowanych obiektach instalacje do ogrzewania podłoża w szklarni lub tunelu winny stanowić standardowe wyposażenie techniczne obiektu. Z przeglądu wielu wyników badań wynika bowiem jednoznacznie, że ogrzewane podłoże wpływa korzystnie na ilość i jakość plonu ale również wywiera pozytywny wpływ na zmniejszenie ogólnego zapotrzebowania ciepła [2,7,12]. W projektowaniu instalacji istotnym problemem jest oszacowanie strumienia ciepła dostarczanego do ogrzewanego podłoża. Niewłaściwy dobór parametrów czynnika grzejnego może doprowadzić z jednej strony do nieprawidłowego pola temperatury w podłożu, a z drugiej zaś do nadmiernych strat ciepła. Zagadnienie właściwego doboru parametrów czynnika

grzejnego jest również istotne przy wykorzystaniu do ogrzewania w sposób bezpośredni niskotemperaturowych źródeł ciepła (np. wody zrzutowe z elektrociepłowni). Występujące problemy przy ogrzewaniu podłoża (zagadnienia energetyczne, przepływ ciepła i wody glebowej) były przedmiotem licznych rozważań. I tak, Ahmed i in. [1] do opisu ruchu ciepła i wody glebowej wykorzystali teorie Philipa i de Vriesa, w której występuje sprzężony ruch ciepła z ruchem masy. W badaniach weryfikacyjnych autorzy dokonali oceny zastosowanej teorii oraz stwierdzili, że w badanych warunkach ogrzewanie gleby może dostarczyć blisko 30% ogólnego zapotrzebowania ciepła przez ogrzewaną szklarnię. Boersama i Rybkost [3] badając wykorzystanie niskotemperaturowej wody grzejnej do ogrzewania gleby stwierdzili silną zależność między parametrami geometrycznymi instalacji (głębokość, rozstaw przewodów grzejnych) a ilością ciepła przekazaną z gleby do wnętrza ogrzewanego obiektu. Rakovec i Hocevar [11] analizowali wpływ ogrzewania gleby (systemem zakopanych przewodów grzejnych) na zmiany mikroklimatu w systemie: Gleba-Roślina-Atmosfera oraz określili roczne zmiany w zapotrzebowaniu ciepła wykorzystywanego do ogrzewania gleby. W modelu, temperaturę gleby uzależnili od jej parametrów termofizycznych oraz analizowali wpływ periodycznych zmian czynników meteorologicznych na transport ciepła w glebie. Seki i Komori [13] do określenia pola temperatury i zawartości wody w ogrzewanej glebie (przy pomocy przewodów umieszczonych w niej na założonej głębokości) wykorzystali model Philipa i de Vriesa. Wartości temperatury i zawartości wody w glebie pozbawionej roślinności znaleźli rozwiązując numerycznie równania transportu ciepła i wody glebowej dla kilku wartości temperatury wody grzejnej. Określili również wpływ wilgotności gleby na zmianę analizowanych wielkości. Puri [10] analizował ilościowe zmiany temperatury i wilgotności w glebie ogrzewanej przy pomocy przewodów zasilanych ciepłą wodą, stwierdzając w konkluzji, że temperatura wody grzejnej i odległość od przewodów wywierają silny wpływ na czasowe przebiegi temperatury i wilgotności gleby. Merbaum i in. [8] znaleźli optymalne wartości głębokości i rozstawu przewodów grzejnych instalacji ogrzewającej glebę przy pomocy przewodów zasilanych ciepłą wodą. Analizę przeprowadzili przy założeniu stałości parametrów termofizycznych ogrzewanej gleby. Plaza i in. [9] wykorzystując równanie przewodnictwa ciepła badali czasową zmianę temperatury podłoża ogrodniczego ogrzewanego przy pomocy przewodów elektrycznych. Elwell i in. [4] w badaniach eksperymentalnych określili zmiany wilgotności i temperatury w ogrzewanych glebach.

Z przedstawionego przeglądu literatury wynika, że problematyka ogrzewania gleby przy pomocy przewodów grzejnych była przedmiotem analizy, jednakże badacze analizowali albo występujące procesy albo też na podstawie badań eksperymentalnych szacowali ilość ciepła dla danych systemów lub wybranych parametrów systemu. Do opisu procesów wykorzystywali zazwyczaj teorię Philipa

i de Vriesa lub równanie przewodnictwa cieplnego. Wykorzystanie metod modelowania matematycznego co prawda wzbogaca wiedzę naukową, jednak o przydatności uzyskanych wyników uzyskanych w wyniku rozwiązania teoretycznego decyduje dostępność i dokładność wprowadzanych parametrów modelu oraz możliwości i czas trwania obliczeń. Również założenia upraszczające, wyidealizowane warunki pomiarów sprawiają, że rzadko wyniki teoretyczne można bezpośrednio przenieść na inne warunki. Przenoszenie wyników uzyskiwanych w innych obiektach jest dokonywane za pomocą procedury teorii podobieństwa. Jednym z narzędzi teorii podobieństwa jest tzw. analiza wymiarowa. Stąd głównym celem pracy jest wykorzystanie procedury analizy wymiarowej i określenie zapotrzebowania ciepła przez rozważany system ogrzewania podłoża ogrodniczego przy pomocy przewodów grzejnych zasilanych ciepłą wodą. Przewody te znajdują się na pewnej głębokości (h) a rozstaw ich wynosi (s).

MATERIAŁ I METODA

Szacowanie zapotrzebowania ciepła podczas ogrzewania podłoża systemem zakopanych w nim przewodów grzejnych jest dość trudne, bowiem ilość ciepła zależy od wielu czynników które wpływają na rozpatrywane zjawisko. Aby więc można było poznać ich ilościowy wpływ wymagane byłoby wykonanie dużej ilości pomiarów, a w konsekwencji operowanie dużą ilością danych. W celu zmniejszenia liczby pomiarów, z równoczesnym uwzględnieniem wszystkich istotnych czynników wpływających na szukaną gęstość strumienia ciepła zastosowano procedurę analizy wymiarowej. Metoda ta polega na tym, że rozpatrywany proces (opisany funkcją zawierającą zmienne niezależne) przedstawiany jest w postaci bezwymiarowych modułów (liczb podobieństwa).

Zgodnie z teorematem Buckinghama [5,14] do opisu rozważanego procesu należy wykorzystać minimalną liczbę zarówno zmiennych jak i bezwymiarowych modułów. Jednak końcowa liczba modułów winna być taka, aby ujmowały one związek między wyszczególnionymi zmiennymi niezależnymi, oraz w taki sposób, aby były one wielkościami bezwymiarowymi.

Analizując jednostkowe zapotrzebowanie ciepła przy ogrzewaniu podłoża (P) można stwierdzić, że zależy ono od temperatury wewnątrz obiektu (t_{wev}), właściwości termofizycznych podłoża (przewodnictwo cieplne – λ , pojemność cieplna – C_V), głębokości umieszczenia przewodów grzejnych (h) oraz temperatury w podłożu na zadanej głębokości (t_h).

Można więc formalnie zapisać następującą zależność funkcyjną:

$$P = f(\lambda, C_V, h, t_{wev}, t_h) \quad (1)$$

Aby więc ustalić zależność jednostkowego zapotrzebowania ciepła od wyszczególnionych zmiennych niezależnych oraz przyjmując tylko pięć ich wartości, konieczne byłoby wykonanie 3125 doświadczeń. Aby ograniczyć liczbę kombinacji doświadczeń, konieczne jest jednak wprowadzenie tzw. liczb podobieństwa.

W procedurze wyprowadzenia poszczególnych liczb podobieństwa wykorzystane zostaną następujące podstawowe wymiary: długość (L) – m, masa (M) – kg, czas (τ) – s oraz temperatura (T) – K.

Jak widać, w rozważanym zagadnieniu występuje sześć zmiennych (n) oraz cztery podstawowe wymiary (r). Zgodnie z twierdzeniem Π ilość liczb podobieństwa (k) wynosi:

$$k = n - r \quad (2)$$

Czyli w opisie rozważanego zagadnienia należy utworzyć dwie liczby bezwymiarowe, które ujmować będą wyszczególnione zmienne niezależne. Uwzględniając wymiary podstawowych jednostek dla poszczególnych zmiennych otrzymujemy następujące równania:

$$[P] = M^1 L^0 \tau^{-3} T^0 \quad (3a)$$

$$[\lambda] = M^1 L^1 \tau^{-3} T^{-1} \quad (3b)$$

$$[C_V] = M^1 L^{-1} \tau^{-2} T^{-1} \quad (3c)$$

$$[h] = M^0 L^1 \tau^0 T^0 \quad (3d)$$

$$[t_{wew}] = M^0 L^0 \tau^0 T^1 \quad (3e)$$

$$[t_n] = M^0 L^0 \tau^0 T^1 \quad (3f)$$

W myśl założeń analizy wymiarowej funkcję (1) można przedstawić w postaci:

$$P = A \cdot \lambda^a \cdot C_V^b \cdot h^c \cdot t_{wew}^d \cdot t_n^e \quad (4)$$

Ponieważ równanie to musi być wymiarowo jednorodne, po uwzględnieniu związków: 3a...3f oraz wymiarów przyjętych jednostek, można więc napisać:

$$\text{kg}^1 \cdot \text{m}^0 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^0 = A \cdot [\text{kg}^1 \cdot \text{m}^1 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}]^a \cdot [\text{kg}^1 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]^b \cdot [\text{kg}^0 \cdot \text{m}^1 \cdot \text{s}^0 \cdot \text{K}^0]^c \cdot [\text{kg}^0 \cdot \text{m}^0 \cdot \text{s}^0 \cdot \text{K}^1]^d \cdot [\text{kg}^0 \cdot \text{m}^0 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^1]^e \quad (5)$$

Jeżeli funkcja ma być jednorodna, to wymiary muszą znieść się po obu stronach równania (5); stąd równania wykładników przybierają postać:

$$\begin{aligned} \text{Dla: } [\text{kg}]: & 0 = a + b, \\ [\text{m}]: & 0 = a - b + c, \\ [\text{s}]: & -3 = -3a - 2b, \\ [\text{K}]: & 0 = -a - b + d + e. \end{aligned}$$

Z rozwiązania tego układu równań wynika:

$$a = 1; \quad b = 0; \quad c = -1 \quad \text{oraz} \quad d = 1-e.$$

Czyli równanie (4) można zapisać w postaci:

$$P = A \cdot \lambda^1 \cdot C_V^0 \cdot h^{-1} \cdot t_{wev}^{1-e} \cdot t_h^e \quad (6)$$

Grupując wyrażenia z jednakowymi wykładnikami potęg otrzymuje się ostatecznie:

$$\frac{P \cdot h}{\lambda \cdot t_{wev}} = A \cdot \left(\frac{t_h}{t_{wev}} \right)^e \quad (7)$$

Czyli, w ostateczności otrzymane zostały dwie liczby podobieństwa:

$$\Pi_1 = \frac{P \cdot h}{\lambda \cdot t_{wev}} \quad \text{oraz} \quad \Pi_2 = \left(\frac{t_h}{t_{wev}} \right).$$

Ostatecznie równanie (1) można zapisać w postaci:

$$\Pi_1 = f(\Pi_2) \quad (8)$$

Z przedstawionej metodyki wynika jednoznacznie, że analizując rozważany system wystarczy zbadać zależności pomiędzy wyszczególnionymi zmiennymi co przyczyni się nie tylko do zmniejszenia liczby kombinacji czynników doświadczenia ale również, po spełnieniu kryteriów podobieństwa, otrzymane wyniki można przenosić na obiekty podobne. Opracowana metoda została zastosowana w obiekcie rzeczywistym, w którym podczas wykonywania eksperymentów dokonywano pomiarów wyszczególnionych wielkości. Badania przeprowadzono w szklarni o powierzchni 0,5 ha w której zainstalowano system ogrzewania podłóża. Ciepła woda kierowana była do systemu przewodów grzejnych (zlokalizowanych na różnej głębokości). Temperaturę podłóża mierzono na głębokościach: 5, 10, 15, 20 i 25 cm, w odległościach od osi symetrii przewodu grzejnego równych: 0, 10, 20 i 30 cm. Podczas wykonywania pomiarów mierzono również objętościowe natężenie czynnika grzewczego oraz temperaturę zasilania i powrotu wody grzejnej przepływającej przez przewody grzejne. Więcej szczegółów opisujących eksperyment zamieszczono w pracy [7].

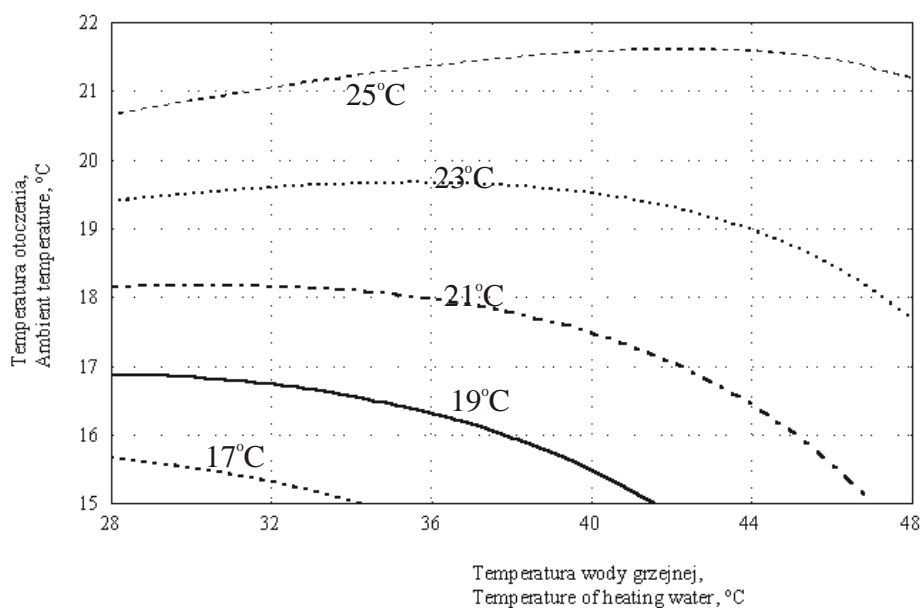
Do porównania między wyliczonymi i zmierzonymi wielkościami wykorzystano standardowe mierniki oceny (średni błąd kwadratowy, oraz lokalne błędy względne).

WYNIKI I DYSKUSJA

Podczas badań, zmiennymi parametrami były: temperatura wewnątrz obiektu, temperatura wody grzejnej, wilgotność podłóża oraz głębokość umieszczenia przewodów grzejnych. Zakres zmian zmiennych niezależnych mieścił się w prze-

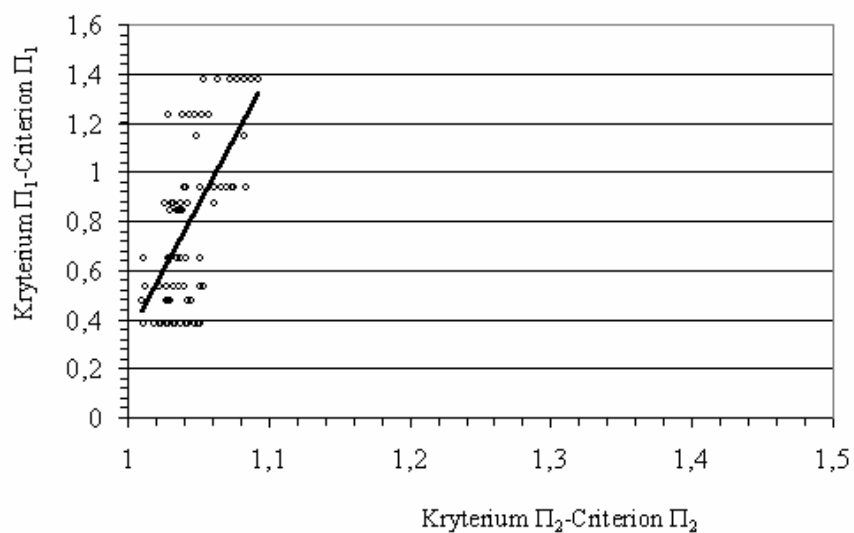
dziale: $15,6 \leq t_{weW} \leq 20,8^\circ\text{C}$; $h = 7,3$ oraz $h = 19,5$ cm; $57,5 \leq$ wilgotność podłoża $\leq 65\%_{\text{vol}}$; $17,5 \leq t_h \leq 35,1^\circ\text{C}$; $30,8 \leq$ temperatura wody grzejnej $\leq 45,1^\circ\text{C}$. Przewodność cieplną podłoża odczytano z pracy [6].

Na rysunkach 1, 2 i 3 przedstawiono zmianę przyjętych kryteriów (Π_1 , Π_2) dla temperatury podłoża na różnej głębokości (5 cm – rys. 1; 10 i 15 cm – rys. 2; 20 cm i 25 cm rys. 3). Całkowity zakres zmian kryterium Π_1 mieści się w granicach od 0,38 do 1,39, zaś Π_2 od 1,01 do 1,4. Można zauważyć, że we wszystkich analizowanych przypadkach, wraz ze wzrostem ilorazu t_h/t_{weW} (kryterium Π_2) kryterium Π_1 wykazuje tendencję rosnącą. Równocześnie stwierdzono, że najmniejszy zakres zmiany kryterium Π_2 występujący na głębokości 5 cm można wytłumaczyć wpływem temperatury otoczenia na warunki termiczne w wierzchniej warstwie podłoża. Z kolei, największe wartości kryterium Π_2 występują na głębokości umieszczenia przewodów grzejnych – głębokość 15 i 20 cm (rys. 4 i rys. 5).

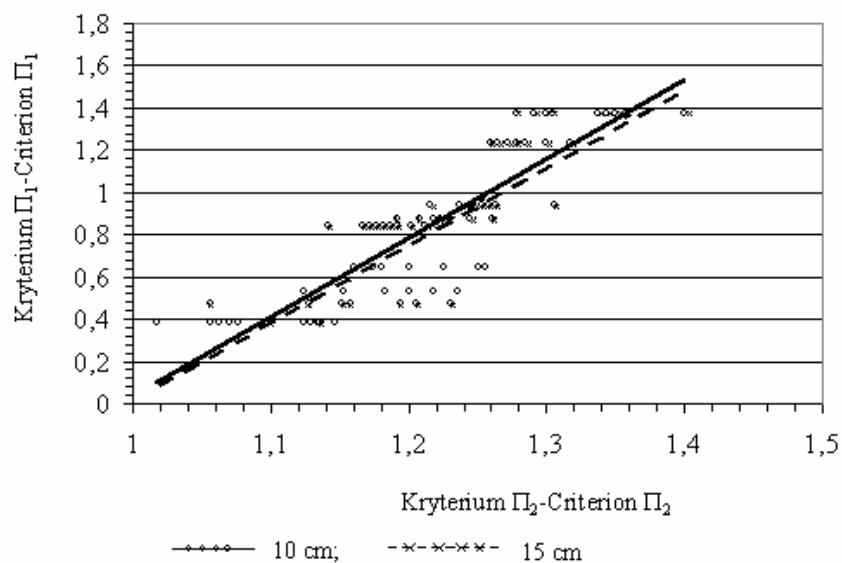


Rys. 1. Średnia temperatura ogrzewanego podłoża w funkcji temperatury wody grzejnej i temperatury otoczenia

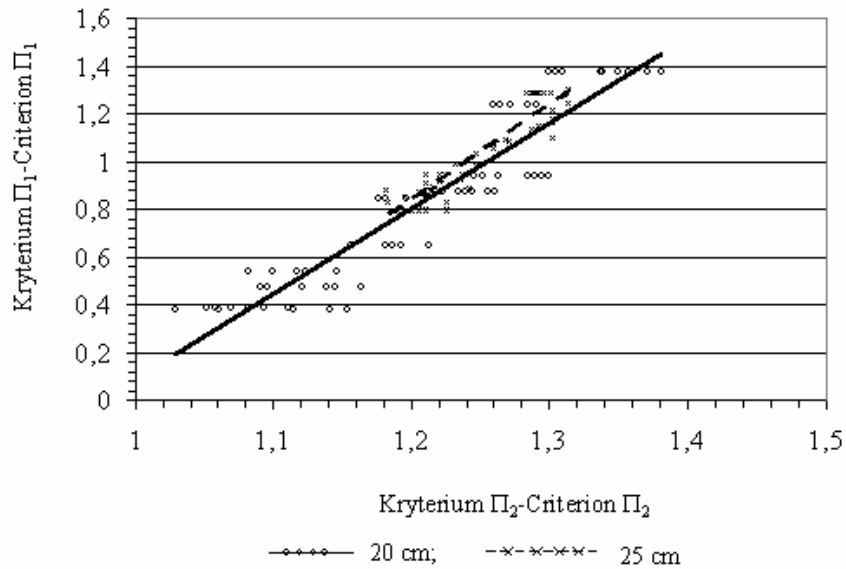
Fig. 1. Average temperature of heated greenhouse substrate in function of temperature of heating water and environment temperatures



Rys. 2. Zależność kryterium Π_1 od kryterium Π_2 na głębokości $h = 5$ cm
Fig. 2. Dependence of criterion Π_1 versus criterion Π_2 on depths $h = 5$ cms

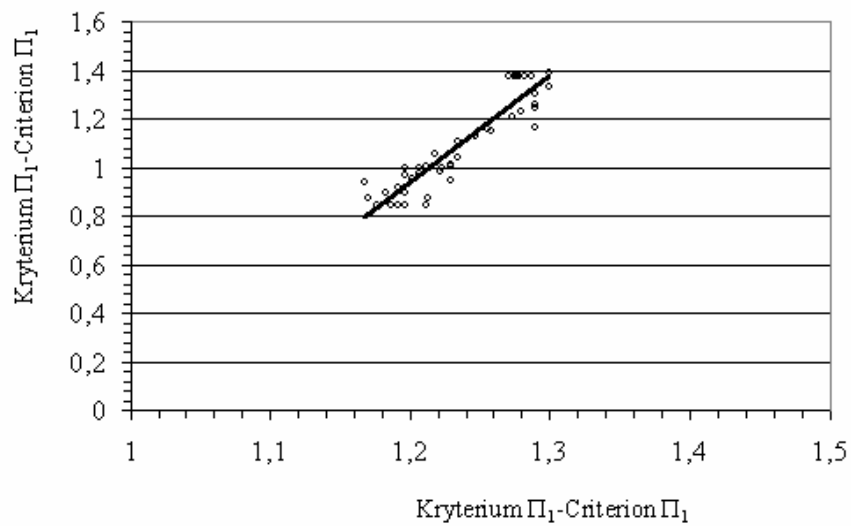


Rys. 3. Zależność kryterium Π_1 od kryterium Π_2 na głębokości $h = 10$ i 15 cm
Fig. 3. Dependence of criterion Π_1 versus criterion Π_2 on depths $h = 10$ and 15 cm



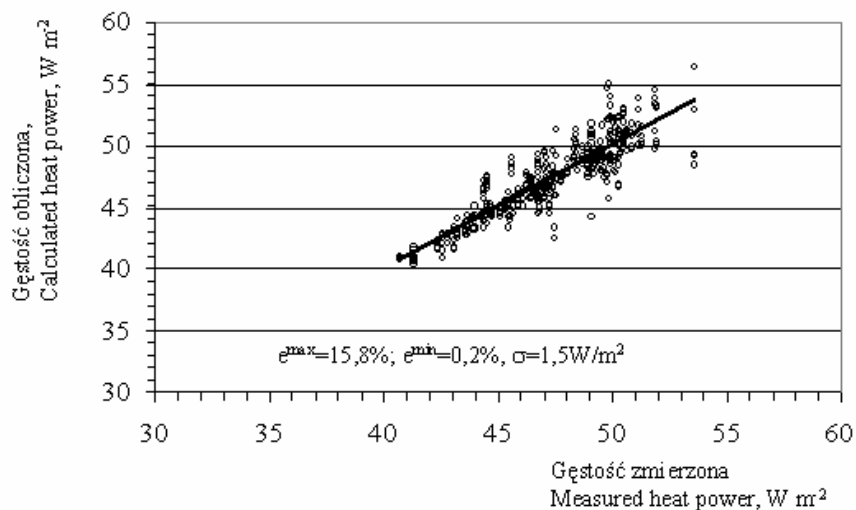
Rys. 4. Zależność kryterium Π_1 od kryterium Π_2 na głębokości $h = 20$ i 25 cm

Fig. 4. Dependence of criterion Π_1 versus criterion Π_2 on depths $h = 20$ and 25 cm



Rys. 5. Zależność kryterium Π_1 od kryterium Π_2 na głębokości $h = 25$ cm

Fig. 5. Dependence of criterion Π_1 versus criterion Π_2 on depths $h = 25$ cm



Rys. 6. Porównanie między zmierzoną i obliczoną gęstością strumienia ciepła

Fig. 6. Comparison between measured and calculated density of heat power

Równanie korelacyjne (określone estymacją nieliniową metodą quasi-Newtona przy zachowanym współczynniku zbieżności 0,001) przyjmuje postać:

$$\Pi_1 = 0,49 \cdot \Pi_2^{3,33} \quad R^2 = 0,67$$

w przedziale stosowania: $40,7 \leq P \leq 53,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; $0,073 \leq h \leq 0,195 \text{ cm}$;
 $0,4 \leq \lambda \leq 0,475 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $15,6 \leq t_{wev} \leq 20,8^\circ\text{C}$ oraz $15,3 \leq t_h \leq 27^\circ\text{C}$.

Oznacza to, że uzyskane wyniki można przenosić na obiekty podobne w podanym zakresie zmienności zmiennych niezależnych. Równanie korelacyjne do szacowania niezbędnej gęstości strumienia ciepła dostarczanego do ogrzewanego podłoża (powstałe z przekształcenia równania 7, zaś parametry równania znalezione również w wyniku stosowania estymacji nieliniowej) przyjmuje następującą postać:

$$P = 55,89 \cdot \left(\frac{\lambda \cdot t_{wev}}{h} \right)^{0,06} \cdot \left(\frac{t_h}{t_{wev}} \right)^{0,52} \quad R^2 = 0,78$$

Równanie to można stosować w podobnie jak poprzednio (zależność $\Pi_1 = f(\Pi_2)$) w zakresie zmiennych niezależnych.

Na rysunku 4 przedstawiono porównanie zmierzonej i obliczonej (z powyższego równania) gęstością strumienia ciepła. Jak widać porównanie to cechuje duża zbieżność uzyskanych wyników.

WNIOSKI

1. Całkowity zakres zmian kryterium Π_1 mieści się w granicach od 0,38 do 1,39, zaś Π_2 od 1,01 do 1,4.

2. Równanie korelacyjne do określenia zależności między przyjętymi kryteriami opisuje zależność: $\Pi_1 = 0,49 \cdot \Pi_2^{3,33}$, $R^2=0,67$, zaś zależność opisująca niezbędną wartość gęstości strumienia ciepła przybiera postać:

$$P = 55,89 \cdot \left(\frac{\lambda \cdot t_{wew}}{h} \right)^{0,06} \cdot \left(\frac{t_h}{t_{wew}} \right)^{0,52} \quad R^2 = 0,78$$

w przedziale stosowania: $40,7 \leq P \leq 53,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $0,073 \leq h \leq 0,195 \text{ cm}$; $0,4 \leq \lambda \leq 0,475 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $15,6 \leq t_{wew} \leq 20,8^\circ\text{C}$ oraz $15,3 \leq t_h \leq 27^\circ\text{C}$.

PIŚMIENNICTWO

1. **Ahmed A.A., Hamdy M.Y., Roller W.L., Elwell D.L.:** Technical Feasibility of utilizing reject heat from power stations in greenhouses. *Trans. ASAE* 26, 1, 200-206, 1983.
2. **Beck D., Sady W., Wojtaszek T.:** Wpływ temperatury powietrza i strefy korzeniowej na wybrane aspekty wzrostu i rozwoju pomidora. *Post. Nauk Roln.*, 3, 39-57, 1990.
3. **Boersama L., Rybkost K.A.:** Soil warming with power plant waste heat in greenhouses. *Hort Science*, 10(1), 28-31, 1975.
4. **Elwell D.H., Roller W.L., Short T.H.:** Heat and moisture transfer in heated greenhouse soils and floors. *Acta Horticulturae*, 148, 377-384, 1984.
5. **Hobler T.:** Ruch ciepła i wymienniki. WN-T, Warszawa, 1986.
6. **Kurpaska S., Ślipek Z., Łapczyńska-Kordon B.:** The thermal properties of a garden substrate. *Annual Review of Agricultural Engineering*, 1(1), 43-51, 1996.
7. **Kurpaska S.:** Energetyczne aspekty ogrzewania podłoża szklarniowego. *Inżynieria Rolnicza*, 5, 255-262, 1998.
8. **Merbaum A.H., Segal I., Dayan A.:** Design procedures for subsurface soil- warming pipe systems. *Energy in Agriculture* 2, 319-339, 1983.
9. **Plaza S., Benavente R.M., Garcia J.L., Navas L.M., Luna L., Duran J.M., Retamal N.:** Modelling and optimal design of an electric substrate heating system for greenhouse crops. *J. Agric. Engng. Res.*, 73, 131-139, 1999.
10. **Puri V.M.:** Heat and mass transfer analysis and modeling in unsaturated ground soils for buried tube systems. *Energy in Agriculture*, 6, 179- 193, 1987.
11. **Rakovec J. Hocevar A.:** Simulation of soil- and air- microclimate modifications using soil heating with warm water. *Agricultural and Forest Meteorology*, 42, 41-52, 1988.
12. **Rosik-Dulewska Cz.:** Wpływ podgrzewania gleby na zmianę jej właściwości oraz plonowanie warzyw uprawianych w tunelach foliowych. *Rozpr. Habil., Inst. Podstaw Inż. Środ. PAN, Ossolineum*, 1992.
13. **Seki H., Komori T.:** Heat and moisture transfer in soil warming by circulating warm water in buried pipe line. *J. Agr. Met.*, 45(4), 217-226, 1990.
14. **Staniszewski B.:** Wymiana ciepła. *Podstawy teoretyczne*. PWN, Warszawa, 1979.

THE USE OF DIMENSION ANALYSIS FOR RESEARCH
ON THE PROBLEMS OF HEAT FLOW IN WARMED SUBSTRATE

Sławomir Kurpaska

Department of Agricultural Engineering, University of Agriculture
ul. Balicka 104, 30-149 Kraków,
e-mail: rtkurpas@cyf-kr.edu.pl

Abstract. This work presents results of research on thermal problems in horticultural substrate warmed with heating wires. The dimension analysis was used to carry out the analysis of the influence of decision variables (temperature of heating water, environment temperature, substrate humidity, depth of placing the heating wires in the substrate) on the course of temperature changes in the substrate. Applying the procedure of the analysis, two criteria of similarity were derived, defining the range of application of received results for use in other objects. Also defined was the density of heat flux necessary for warming the substrate.

Keywords: greenhouse substrate, heating, dimension analysis