

EKSPERYMENTALNE I OBLICZENIOWE OKREŚLENIE ROZKŁADU TEMPERATURY W POSADZCE I GRUNCIE POD BROJLERNIĄ

Jan Radoń, Waław Bieda, Grzegorz Nawalany

Akademia Rolnicza w Krakowie

Streszczenie. Technologia produkcji brojlerów powoduje, że budynki produkcyjne są używane okresowo. Cykl produkcyjny trwa zwykle około 6,5 tygodnia, po czym następuje 2,5-tygodniowa przerwa technologiczna. Temperatura na początku cyklu powinna wynosić 31–33°C i stopniowo być obniżana do 18°C na końcu cyklu produkcyjnego. Okresowe ogrzewanie budynku oraz zmienna temperatura powietrza wewnętrznego powodują, że uproszczone metody obliczeniowe strat ciepła do gruntu prowadzą do dużych błędów. Obliczenia powinny uwzględniać niestacjonarny, trójwymiarowy przepływ ciepła. Do wyznaczenia przepływu ciepła przez posadzkę budynku inwentarskiego zbudowano autorski model obliczeniowy oraz program komputerowy o nazwie KLIMAT_INW. Dla sprawdzenia poprawności działania programu przeprowadzono długoterminowe pomiary przepływu ciepła w gruncie pod budynkiem brojlerni. Wyniki pomiarów porównano z wynikami obliczeń. Duża zgodność wyników, choć uzyskana przy pewnych założeniach upraszczających, pozwala przypuszczać, że zastosowany model trójwymiarowego, niestacjonarnego przepływu ciepła może dawać wiarygodne wyniki.

Słowa kluczowe: brojlernia, przepływ ciepła, grunt, walidacja, model obliczeniowy

WSTĘP

Stosowane obecnie metody wymiarowania termicznego budynków inwentarskich nie dają możliwości prognozowania kształtowania się jego mikroklimatu w ciągu całego roku. Główną przeszkodą jest bazowanie na stacjonarnych bilansach ciepła i wilgoci, a co za tym idzie, założeniu niezmienności parametrów klimatycznych wewnątrz i na zewnątrz budynku w okresie bilansowania. Tymczasem mikroklimat kształtuje się dynamicznie na skutek zmiennych oddziaływań klimatu zewnętrznego oraz wewnętrznych procesów cieplnych i wilgotnościowych.

Adres do korespondencji – Corresponding author: Jan Radoń, Akademia Rolnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Katedra Budownictwa Wiejskiego, al. Mickiewicza 24–28, 30-059 Kraków, e-mail: zbw@ar.krakow.pl

Przegrodą posiadającą największą akumulacyjność cieplną jest posadzka i grunt pod budynkiem. W budownictwie mieszkaniowym fakt ten został uwzględniony poprzez wprowadzenie specjalnej metody obliczania strat ciepła do gruntu w normie PN-B-02025 (1999), dotyczącej obliczania sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków. Jednym z założeń tej metody jest stała temperatura powietrza wewnątrz budynku ogrzewanego.

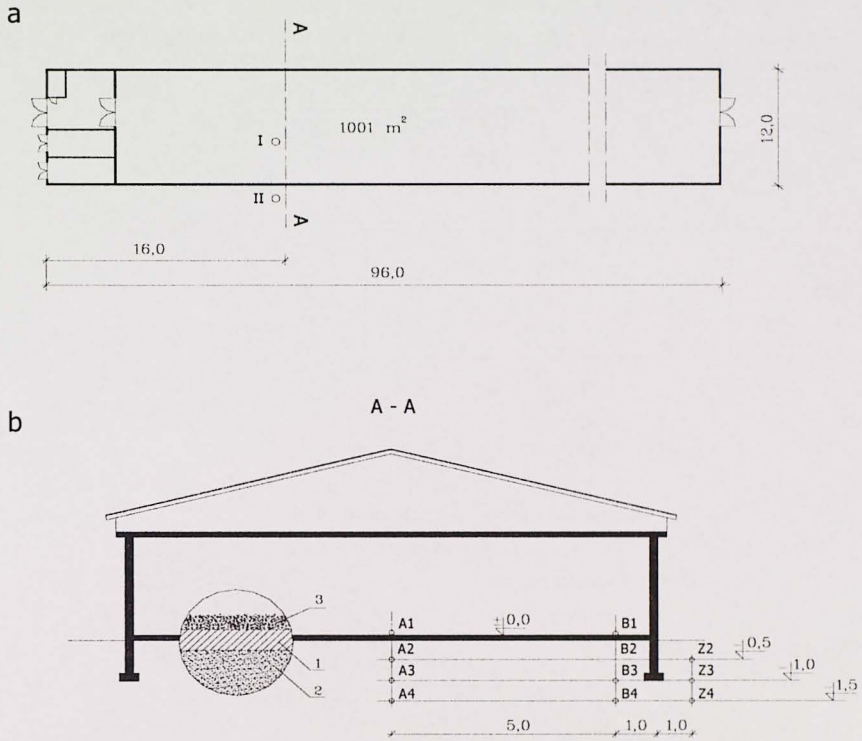
W budynku inwentarskim panują odmienne warunki klimatyczne niż w budynkach mieszkalnych. Pomiędzy powietrzem wewnętrznym a powierzchnią posadzki znajduje się ściółka, która wskutek zachodzących w niej procesów biotermicznych i bezpośredniego oddziaływania zwierząt zasadniczo zmienia mechanizm wymiany ciepła między budynkiem a gruntem. Ponadto niektóre budynki, jak np. brojlernia, są używane okresowo, a wymagana temperatura wewnętrzna ulega istotnym zmianom w ciągu cykli produkcyjnych.

W świetle wymienionych uwarunkowań można stwierdzić, że zastosowanie uproszczonych metod obliczeniowych w budynkach rolniczych musi prowadzić do dużych błędów. Pełne rozwiązanie zagadnienia przepływu ciepła w gruncie z uwzględnieniem wszystkich czynników, jak: opady deszczu, filtracja wilgoci, pokrywa śnieżna, przemarzanie, nie jest obecnie możliwe. W artykule przedstawiono autorski sposób obliczenia przepływów ciepła w posadzce i gruncie oparty na rozwiązaniu niestacjonarnego, trójwymiarowego przepływu ciepła z pominięciem wymienionych czynników. Wyniki obliczeń teoretycznych porównano z wynikami badań eksperymentalnych.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH I OBLICZEŃ

Badania eksperymentalne kształtowania się temperatury w gruncie przeprowadzono w jednym z dziesięciu budynków dużej fermy brojlerów w Ujeździe (woj. małopolskie). Budynek ten składa się z pomieszczenia produkcyjnego o powierzchni 1001 m² oraz pomieszczeń pomocniczych o łącznej powierzchni 62,5 m². Obsada brojlerni wynosi w okresie letnim od około 16 000 do maksymalnie 18 000 kurczaków w zimie. Rzut i przekrój obiektu wraz z punktami pomiarowymi pokazano na rysunku 1. Podłogę w całym budynku stanowi posadzka betonowa. W czasie odchowu na powierzchni posadzki hali produkcyjnej znajduje się ściółka. W całym okresie pomiarów stosowano ściółkę z długiej słomy jęczmiennej.

Powszechnie wiadomo, że jedną z cech przepływu ciepła w gruncie jest duże, dochodzące nawet do kilku miesięcy przesunięcie fazowe strumienia ciepła [Bieda 1977]. Stąd też badania eksperymentalne prowadzono przez prawie cały rok w okresie 4.06.2004–18.04.2005. Pomiary dokonywane były automatycznie co 6 minut, a uśrednione wyniki zapisywane na pamięci logerów typu Agilent oraz DT50 co godzinę. Temperatura w gruncie i ściółce mierzona była za pomocą czujników rezystancyjnych typu TOP106 z dokładnością $\pm 0,12^{\circ}\text{C}$ [KFAP 2003]. Z uwagi na ograniczoną pamięć logerów dane pomiarowe były odczytywane co dwa tygodnie. Wszystkie badania wykonywano w budynku będącym w trakcie produkcji. W ich wyniku uzyskano godzinowe przebiegi temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego, temperatury w ściółce i posadzce oraz poszczególnych punktach pomiarowych (por. rys. 1). Wyniki

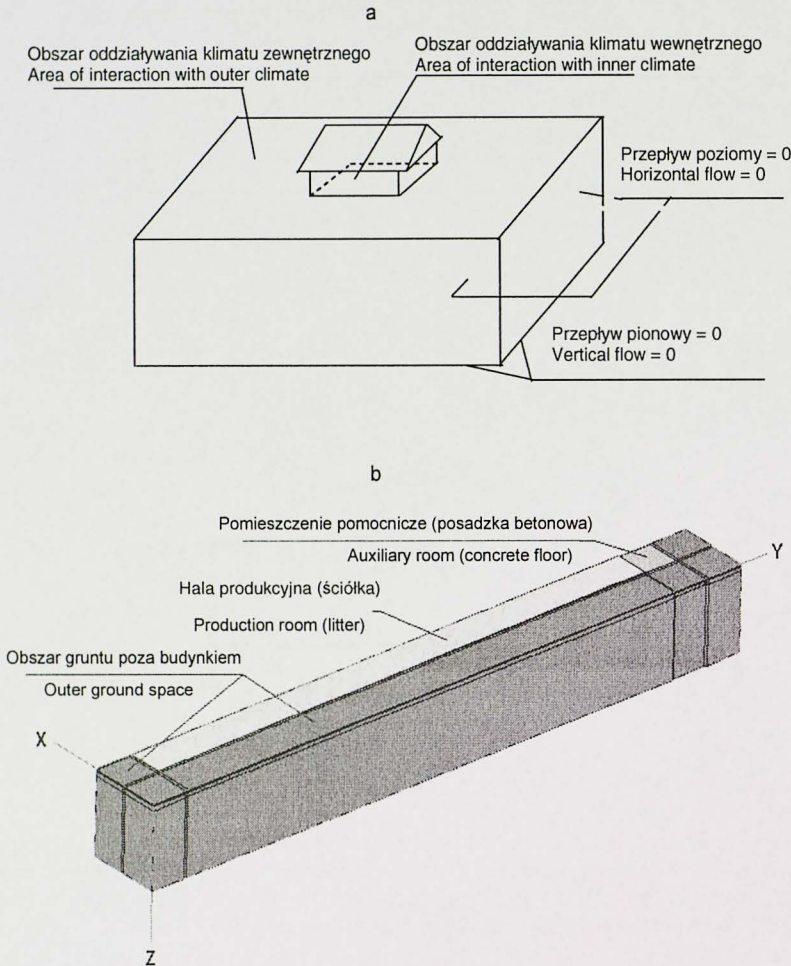


Rys. 1. Badana brojlernia i położenie punktów pomiarowych: a – rzut poziomy z płaszczyzną pomiarową (A–A) oraz punktami pomiaru temperatury powietrza wewnętrznego (I) oraz zewnętrznego (II), b – przekrój poprzeczny z punktami pomiarowymi w ściółce oraz gruncie pod brojlernią i na zewnątrz brojlerni oraz budowa posadzki; 1 – wylewka betonowa, 2 – grunt, 3 – ściółka

Fig. 1. Investigated broiler house and measuring points: a – view of the floor with measuring section (A–A) and measuring points of internal (I) and external (II) air temperature, b – cross section with measuring points in litter and in the ground under and outside of broiler house and with assembly of the floor; 1 – concrete layer, 2 – ground, 3 – litter

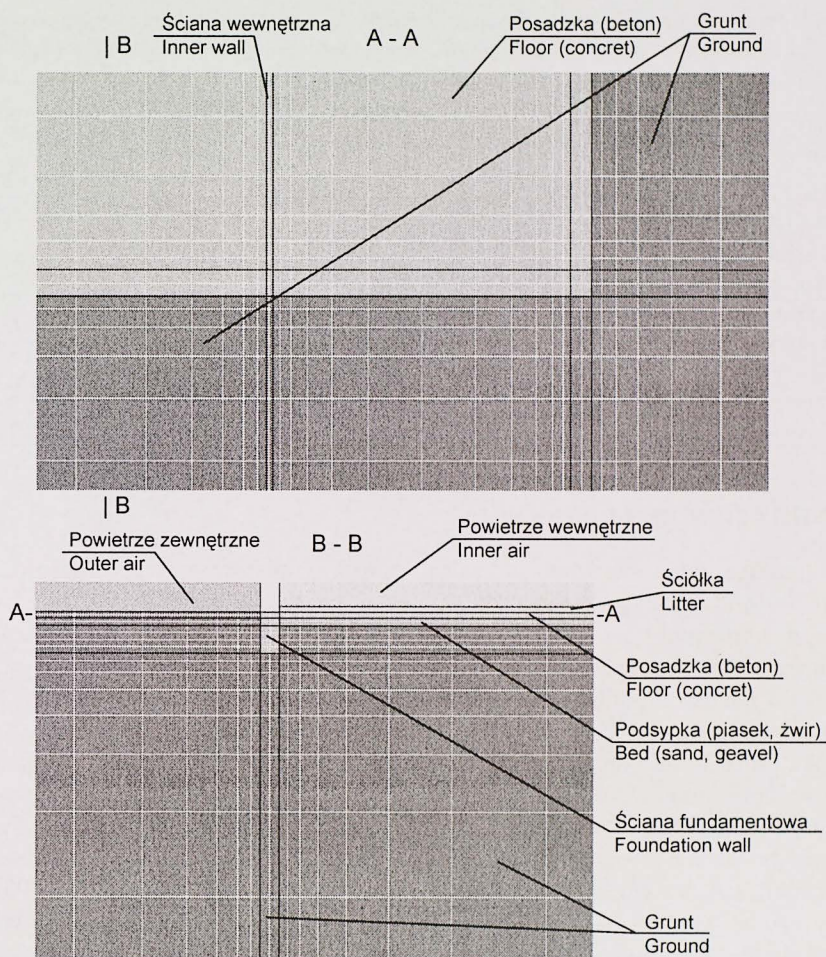
pomiarów temperatury powietrza i ściółki posłużyły do określenia warunków brzegowych, natomiast pomierzone przebiegi temperatury w gruncie do porównania z wynikami obliczeń teoretycznych.

Obliczenia przepływów ciepła w gruncie wykonano za pomocą autorskiego modelu obliczeniowego i programu komputerowego o nazwie KLIMAT_INW [Radoń 2004]. Model obliczeniowy zakłada wyodrębnienie prostopadłościanu gruntu pod budynkiem i w okolicy budynku, w którym zachodzi trójwymiarowy przepływ ciepła. Na rysunku 2 przedstawiono wyodrębniony obszar gruntu wraz z powierzchniami oddziaływań mikroklimatu wewnętrznego i klimatu zewnętrznego (rys. 2a) oraz obszar gruntowy przy



Rys. 2. Model fizyczny i geometryczny ośrodka gruntowego do obliczeń przepływu ciepła:
 a – koncepcja, b – obszar gruntowy badanej brojlerni, przyjęty do obliczeń
 Fig. 2. Physical and geometrical model of ground medium for calculation of heat flow: a – concept, b – ground medium of investigated broiler house, defined for calculations

jęty do obliczeń, odpowiadający badanej brojlerni (rys. 2b). Na powierzchniach bocznych oraz podstawie prostopadłościanu gruntu zakłada się brak przepływu ciepła w kierunku prostopadłym do powierzchni (płaszczyzna adiabatyczna). Z uwagi na jedną oś symetrii do obliczeń przyjęto połowę budynku. Do wyznaczenia pola temperatury zastosowano metodę bilansów elementarnych [Gduła 1984]. Przestrzeń gruntową podzielono na elementy bilansowo-różnicowe z zagęszczeniem podziału w miejscach występowania większych zmian temperatury (narożniki, okolice przegród zewnętrznych). Na rysunku 3 pokazano podział przestrzenny obszaru gruntowego w rzucie poziomym w okolicy pomieszczenia pomocniczego oraz w przekroju poprzecznym. Pomimo zmian



Rys. 3. Poziomy (A-A) oraz pionowy (B-B) podział przestrzenny ośrodka gruntowego na elementy bilansowo-różnicowe.

Fig. 3. Horizontal (A-A) and vertical (B-B) spatial division of the ground medium into balance-differential elements

nego podziału uzyskano łącznie 15 576 elementów bilansowych. Do rozwiązywania równań bilansowych zastosowano schemat jawny (iloraz różnicowy przedni) [Gdula 1984]. Własności fizyczne gruntu oraz posadzki oszacowano na podstawie badań makroskopowych oraz literatury [Pogorzelski 1976, Wiśniewski 1979] i norm PN-EN ISO 6946 [1999] i DIN EN ISO 13370 [1998]. Ściółka zmienia własności fizyczne w czasie cykli produkcyjnych wskutek stopniowego nasączenia wilgocią i odchodami. Na podstawie zmian jej zawilgocenia, wyznaczonego eksperymentalnie, można określić zakres zmian przewodności i pojemności cieplnej w czasie cyklu hodowlanego [Radoń 2004]. Parametry fizyczne ściółki, posadzki, ścian fundamentowych i gruntu przyjęte do obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry fizyczne ściółki, posadzki, ścian fundamentowych i gruntu przyjęte do obliczeń
 Table 1. Physical parameters of litter, floor, foundation walls and ground taken into calculations

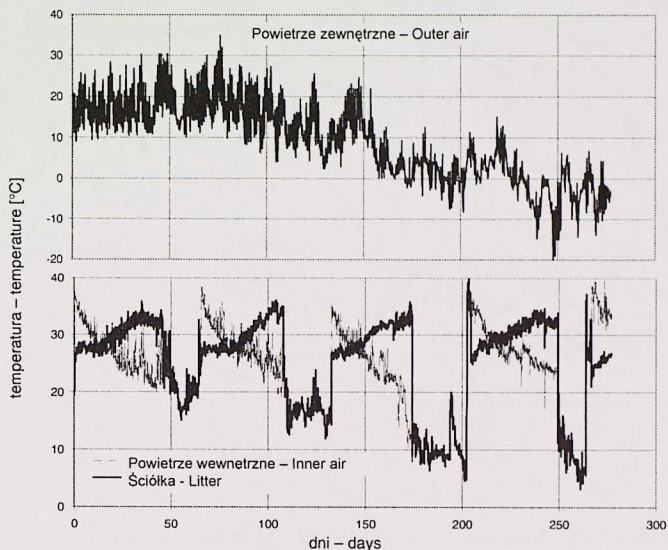
Material Material	Grubość Thickness [m]	Przewodność cieplna Thermal conductivity [W·(m·K) ⁻¹]	Pojemność cieplna Thermal capacity [kJ·(m ³ ·K) ⁻¹]
Ściółka – Litter	0,1	0,08-0,7	266-700
Posadzka (beton 2200) Floor (concrete 2200)	0,1	1,5	1848
Ściana fundamentowa (beton 2400) Foundation wall (concrete 2400)	0,4	1,8	2016
Podsypka (piasek, żwir) Bed (sand, gravel)	0,15	1,6	2000
Grunt – Ground	---	1,7	1500

WYNIKI OBLICZEŃ I DYSKUSJA

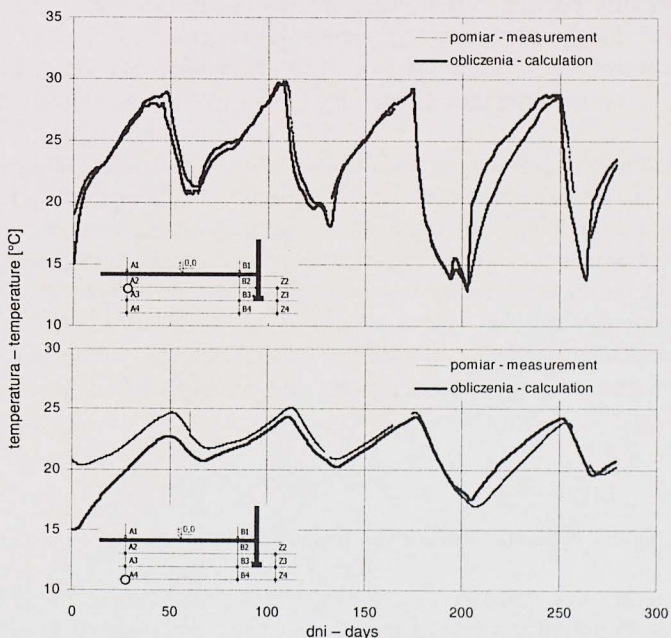
Obliczenia przeprowadzono dla całego okresu pomiarowego wynoszącego 279,42 dni (6706 godzin). Jako warunek brzegowy wewnątrz budynku przyjęto godzinowe wartości temperatury ściółki, a na zewnątrz temperatury powietrza zewnętrznego ze współczynnikiem wymiany ciepła na powierzchni gruntu równym $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Na rysunku 4 pokazano pomierzone temperatury powietrza wewnętrznego oraz zewnętrznego oraz temperatury ściółki. Jako warunek początkowy przyjęto jednakową w całym ośrodku gruntowym temperaturę 15°C . Jak określono na wstępie, pominięto wiele dodatkowych czynników klimatycznych (opady deszczu, promieniowanie słoneczne, pokrywa śnieżna), uznając, że największy wpływ na przepływy ciepła w gruncie ma temperatura powietrza zewnętrznego. Taką tezę wysunęli również inni naukowcy na podstawie obliczeń strat ciepła do gruntu w budynkach mieszkalnych [Deru i in. 2003].

Na podstawie wyników obliczeń rozkładów temperatury, odpowiadających poszczególnym krokom czasowym, w całym ośrodku gruntowym wyznaczono przebiegi temperatury w punktach pomiarowych. Wartości te określono poprzez liniową interpolację temperatury z elementów bilansowo-różnicowych sąsiadujących z tymi punktami. Przebiegi temperatury wyznaczone eksperymentalnie oraz obliczeniowo zestawiono dla wybranych punktów pomiarowych na rysunkach 5, 6, 7. Jak można zauważyć, krzywa pomiarowa w trzech miejscach nie jest ciągła. Te krótkotrwałe (co najwyżej kilkunastosekundowe) przerwy w pomiarach były spowodowane brakiem prądu, niestabilnym jego napięciem oraz niekorzystnym dla aparatury pomiarowej mikroklimatem brojlerni.

Przebiegi temperatury pomierzonej oraz obliczonej wykazują duże podobieństwo w każdym punkcie pomiarowym. Szczególnie dobrą zgodność uzyskano w punktach A2 i B2 leżących na głębokości 0,5 m pod posadzką brojlerni. W obszarze tym widać wyraźnie duży wpływ warunków termicznych w ściółce. Zastosowano tutaj warunek brzegowy I rodzaju, określony wprost na podstawie pomiaru temperatury w ściółce. W punktach głębiej położonych (A4, B4) z początku występują większe różnice obu wielkości, które jednak z czasem wyraźnie maleją. Zjawisko to można wytłumaczyć przyjęciem

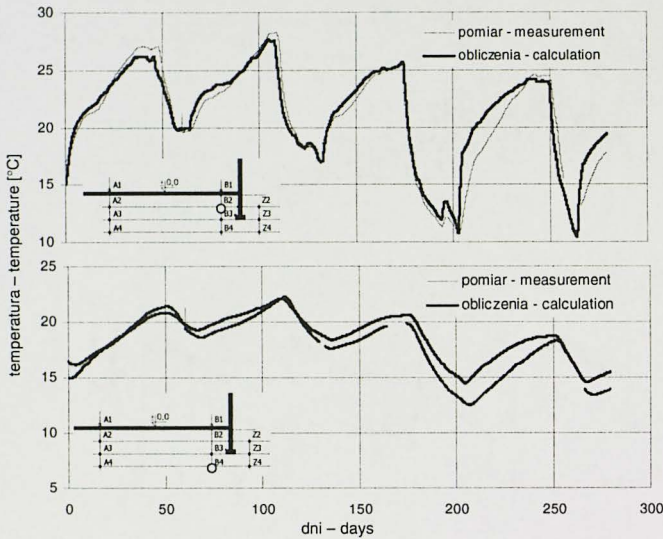


Rys. 4. Przebieg pomierzonej temperatury powietrza wewnętrznego, zewnętrznego oraz ściółki
 Fig. 4. Pattern of measured temperature of outer and inner air and temperature of litter



Rys. 5. Wyznaczony eksperymentalnie i obliczeniowo przebieg temperatury w gruncie w punktach A2 i A4.

Fig. 5. Temperature pattern at points A2 and A4 obtained experimentally and through calculations.



Rys. 6. Wyznaczony eksperymentalnie i obliczeniowo przebieg temperatury w gruncie w punktach B2 i B4

Fig. 6. Temperature pattern at points B2 and B4 obtained experimentally and through calculations

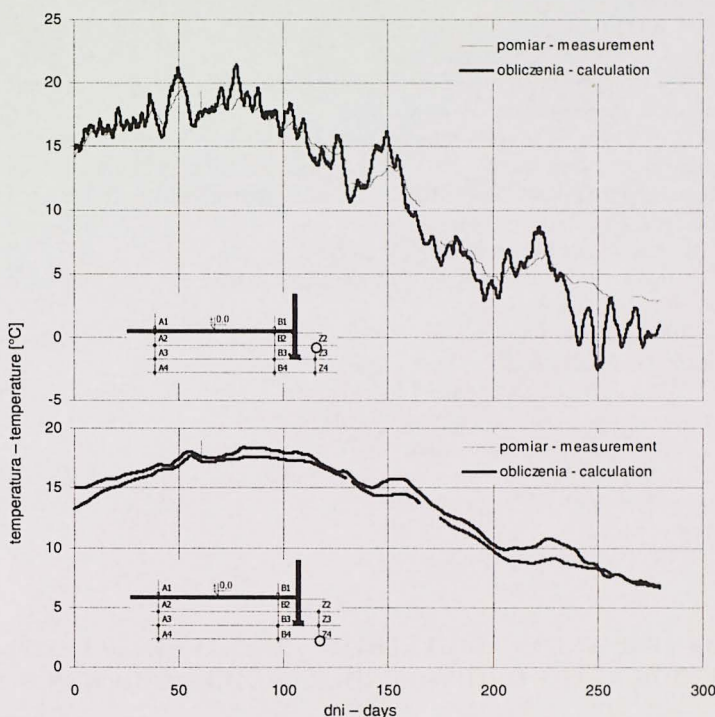
jednakowej temperatury początkowej (równiej 15°C) dla całego obszaru gruntowego. Takie założenie nie odpowiadało rozkładowi temperatury w gruncie na początku pomiarów. Jeśli więc warunek początkowy nie może być precyzyjnie określony, to wyniki obliczeń w początkowym okresie mogą dawać błędne wyniki nawet w ciągu kilkadziesiąt dni.

W obszarze gruntowym położonym poza budynkiem również występuje zadowalająca zgodność wyników eksperymentalnych i obliczeniowych. Na mniejszej głębokości (punkt Z2) występują względnie duże wahania temperatury, które są odbiciem wytłumionych wahań temperatury powietrza zewnętrznego. Amplituda zmian temperatury obliczonej jest większa niż temperatury pomierzonej. Jak można przypuszczać, różnice te wynikają z przyjętych założeń upraszczających. Tym niemniej stopień zgodności krzywych, pokazanych na rysunku 7, potwierdza dominującą rolę temperatury powietrza w określeniu warunku brzegowego na powierzchni gruntu poza budynkiem.

WNIOSKI

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań i obliczeń można wysnuć następujące wnioski:

1. Okresowe ogrzewanie budynku oraz wymagany przebieg temperatury powietrza powodują, że stosowanie uproszczonych metod obliczeniowych (jak np PN-B-02025) do wyznaczenia strat ciepła do gruntu może prowadzić do dużych błędów w niektórych typach budynków inwentarskich. Obliczenia powinny uwzględniać niestacjonarny, trójwymiarowy przepływ ciepła.



Rys. 7. Wyznaczony eksperymentalnie i obliczeniowo przebieg temperatury w gruncie w punktach Z2 i Z4

Fig. 7. Temperature pattern at points Z2 and Z4 obtained experimentally and through calculations

2. Obliczenia rozkładu temperatury w gruncie pod posadzką użytkowanej brojlerni, wykonane za pomocą autorskiego programu komputerowego, wykazały dużą zgodność z wynikami długoterminowych pomiarów eksperymentalnych.

3. Wysoka akumulacyjność gruntu wymaga dokładnego określenia rozkładu temperatury w gruncie na początku obliczeń. Nieprecyzyjne określenie warunku początkowego może negatywnie wpływać na dokładność obliczeń przez pierwszych kilkadziesiąt dni.

4. Zewnętrzny warunek brzegowy jest w największym stopniu determinowany przez temperaturę powietrza zewnętrznego. Pominięcie niektórych czynników klimatycznych (opady deszczu, śnieg, promieniowanie słoneczne) nie spowodowało znaczących odchylek wartości temperatury pomierzonej i wyliczonej.

5. Obliczenia trójwymiarowego, niestacjonarnego przepływu ciepła w gruncie pod budynkiem inwentarskim, z użyciem uproszczonego modelu obliczeniowego, mogą dawać wiarygodne wyniki.

PIŚMIENNICTWO

- Bieda W., 1977. Rola gruntu pod posadzką w gospodarce cieplnej budynku inwentarskiego. Praca doktorska, maszynopis AR w Krakowie.
- DIN EN ISO 13370. 1998. Wärmeübertragung über das Erdreich. Berechnungsverfahren.
- Deru M., Judkoff R., Neymark J., 2003. Whole Building Energy Simulation with a Three-Dimensional Ground-Coupled Heat Transfer Model. ASHRAE Transactions, 03-9-1, 557–565.
- Gdula S., 1984. Przewodzenie ciepła. PWN, Warszawa.
- KFAP, 2003. Czujnik rezystancyjny typu TOP 106. Krakowska Fabryka Aparatów Pomiarowych S.A., ulotka informacyjna.
- PN-B-02025, 1999. Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzania budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej.
- PN-EN ISO 6946, 1999. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- Pogorzelski J.A., 1976. Fizyka ciepła budowli. PWN, Warszawa.
- Radoń J., 2004. Model obliczeniowy i analiza dynamicznego kształtowania się mikroklimatu budynków rolniczych na przykładzie brojlerni. Zesz. Nauk. AR w Krakowie 410, ser. Rozprawy, 299.
- Wiśniewski S., 1979. Wymiana ciepła. PWN, Warszawa.

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL RESEARCH OF TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE GROUND UNDER BROILER CHICKEN HOUSE

Abstract: The production technology of broilers requires periodically use of building. The production cycle lasts usually about 6.5 weeks followed by a 2.5 week technological break. Initial inner air temperature at the beginning of production cycle should be 31–33°C and drop gradually to 18°C at the end. Periodical heating of building and required pattern of inner temperature makes the use of common methods of calculation of heat flow through the ground useless. Transient 3-D heat flow calculation must be applied. In order to determine of heat flows through the floor a theoretical model based on the elementary balance method and software KLIMAT_INW were developed. To check whether the program can provide acceptable results, long term investigation of shaping of temperature in the ground under broiler house have been carried out. The measurement results were compared with calculation. Considerably good coincidence of measured and calculated data allows assuming that 3D heat flow calculation using simplified model can provide reliable results.

Key words: broiler house, heat transfer, ground, validation, calculation model

Zaakceptowano do druku – Accepted for print: 30.05.2006