

*Jan Radoń*  
*Katedra Budownictwa Wiejskiego*  
*Akademia Rolnicza w Krakowie*

## **PROGNOZOWANIE KSZTAŁTOWANIA SIĘ MIKROKLIMATU BUDYNKÓW INWENTARSKICH – MOŻLIWOŚCI I OGRANICZENIA**

### **Streszczenie**

Opisano najważniejsze procesy cieplno-wilgotnościowe zachodzące w pomieszczeniach hodowlanych. Stwierdzono, że określenie podstawowych parametrów mikroklimatu w czasie może nastąpić poprzez budowę i rozwiązanie równań bilansowych ciepła i wilgoci w krótkich okresach czasu. O dokładności rozwiązania decydują możliwości i ograniczenia wyznaczenia zgodnych z rzeczywistością poszczególnych składników równań bilansowych.

**Słowa kluczowe:** mikroklimat, budynek inwentarski, prognozowanie

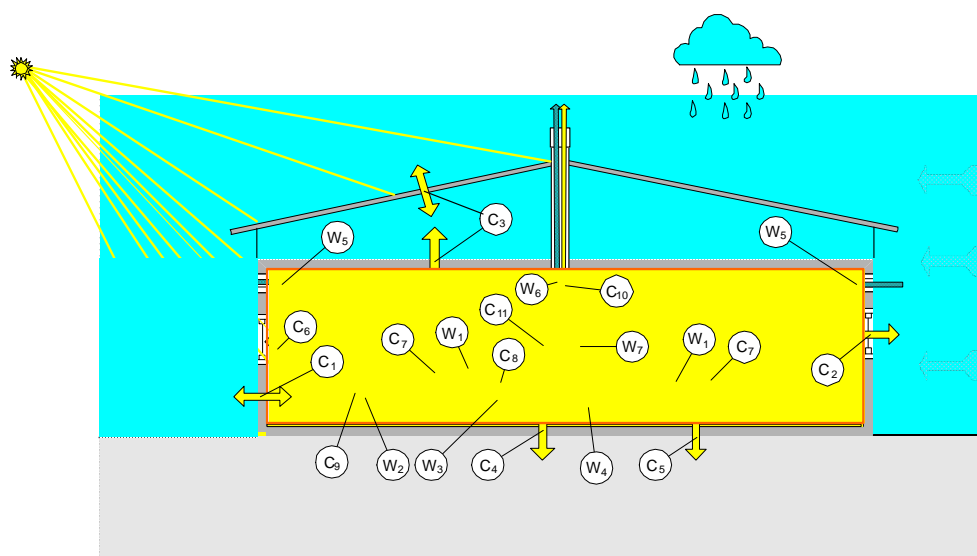
### **Wprowadzenie**

Stosowane dotychczas metody wymiarowania termicznego i określenia wielkości wentylacji budynków inwentarskich bazują na stacjonarnych bilansach ciepła i wilgoci. Takie metody pozwalają wprawdzie na obliczeniowe sprawdzenie bilansu cieplnego budynku (np. sprawdzenie samoogrzewalności), nie umożliwiają jednak określenia zmian mikroklimatu w pomieszczeniu hodowlanym w każdym okresie czasu. Nie uwzględniają one bowiem wpływu akumulacji cieplnej w przegrodach oraz, co jest bardzo istotne, w gruncie pod posadzką.

W artykule podjęto próbę odpowiedzi na pytanie, czy możliwe jest obecnie wiarygodne przewidywanie kształtowania się mikroklimatu budynku inwentarskiego w ciągu całego roku. Takie prognozowanie umożliwia bowiem rozpoznanie i ewentualną eliminację wielu zagrożeń powodowanych niekorzystnymi parametrami mikroklimatu (np. wyziębienia w zimie czy przegrzania budynku w lecie) już na etapie projektowania technologii produkcji i konstrukcji budynku.

## Materiał i metody

Mikroklimat budynku pomieszczenia inwentarskiego jest kształtowany poprzez oddziaływanie wielu czynników jednocześnie. Na rys. 1. pokazano schematycznie najważniejsze procesy cieplne i wilgotnościowe zachodzące w obrębie budynku inwentarskiego.



Rys. 1. Schematyczny obraz przepływu ciepła i wilgoci w budynku inwentarskim. Litery C oznaczają przepływy ciepła: C1–przez ściany zewnętrzne, C2–przez okna, C3–przez strop, C4–przez posadzkę, C5–między zwierzęciem a ściółką i posadzką, C6–zyski od promieniowania słonecznego, C7, C8, C9–ciepło emitowane przez zwierzęta, C10–ciepło wentylacyjne, C11–ciepło grzania (chłodzenia). Litery W oznaczają przepływy wilgoci: W1, W2, W3–emisja wilgoci przez zwierzęta, W4–wymiana wilgoci ze ściółką (posadzką), W5, W6–wymiana wilgoci poprzez wentylację, W7–nawilżanie (osuszanie) powietrza.

Fig. 1. Schematic presentation of heat and moisture flow in livestock building. The C letters stand for heat penetration: C1–through external walls, C2–through windows, C3–through ceiling, C4–through floor, C5–between an animal bedding and floor, C6–gain from solar radiation, C7, C8, C9–heat emitted by the animals, C10–ventilation heat, C11–heating (cooling) heat. The W letters stand for moisture penetration: W1, W2, W3–moisture emitted by the animals, W4–moisture exchange with the bedding (floor), W5, W6–moisture exchange through ventilation, W7–moisturizing (drying) of air

Podstawowymi parametrami mikroklimatu budynku inwentarskiego są temperatura i wilgotność powietrza wewnętrznego. Wyznaczenie przebiegu tych wielkości w czasie jest możliwe jedynie poprzez ujęcie pomieszczenia hodowlanego jako otwartego systemu termodynamicznego, ograniczonego wewnętrznymi powierzchniami przegród, poprzez które następuje określony przepływ ciepła i wilgoci. Istotnym elementem systemu są zwierzęta emitujące ciepło, wilgoć i domieszki gazowe. System ten jest celowo modyfikowany przez użytkownika poprzez czynne oddziaływanie z zewnątrz, takie jak dodatkowy dopływ ciepła (ogrzewanie), sterowany przepływ powietrza i wilgoci (wentylacja, nawilżanie i osuszanie powietrza), odprowadzenie nadmiaru ciepła (chłodzenie). Wyznaczenie przebiegu podstawowych parametrów systemu następuje poprzez zbudowanie i rozwiązanie różnicowych równań bilansowych ciepła i wilgoci powietrza wewnętrznego w krótkich okresach czasu (tzw. krokach czasowych), zazwyczaj co godzinę.

Równanie bilansu ciepła można zapisać w postaci różnicowej:

$$\left[ \left( \frac{356,934}{273 + \vartheta_i} + 1,86 \cdot w_i \right) \cdot \vartheta_i - \left( \frac{356,934}{273 + \vartheta_i'} + 1,86 \cdot w_i' \right) \cdot \vartheta_i' \right] \cdot V \cdot 1000 = \left\{ \sum_j [A_j \cdot \alpha_j \cdot (\vartheta_{p,j} - \vartheta_i)] + \sum_i \dot{Q}_i \right\} \cdot \Delta \tau \quad (1)$$

Lewa strona równania 1. oznacza zmianę entalpii wilgotnego powietrza a prawa obejmuje zewnętrzne przepływy ciepła do i od systemu. Poszczególne wielkości oznaczają:

$\vartheta_i'$  – temperatura powietrza wewnętrznego na początku kroku czasowego [°C],

$\vartheta_i$  – temperatura powietrza wewnętrznego na końcu kroku czasowego [°C],

$V$  – kubatura pomieszczenia w świetle przegród [m<sup>3</sup>],

$A_j$  – wewnętrzna powierzchnia j-tej przegrody (także posadzki) [m<sup>2</sup>],

$\alpha_j$  – współczynnik przyjmowania ciepła na wewnętrznej powierzchni j-tej przegrody [W·(m<sup>2</sup>·K)<sup>-1</sup>],

$\vartheta_{p,j}$  – temperatura wewnętrznej powierzchni j-tej przegrody [°C],

$\sum Q_i$  – suma chwilowych strumieni ciepła: zyski ciepła od nasłonecznienia, ciepło jawne wydzielane przez zwierzęta, zyski/straty ciepła wentylacyjnego, ciepło grzania lub chłodzenia,

$\Delta \tau$  – długość kroku czasowego [s].

Bilans wilgotnościowy systemu opisuje chwilowe zmiany absolutnej wilgotności powietrza w czasie, a odpowiednie równanie różnicowe ma postać:

$$V \cdot (w_i - w_i') = (\dot{W}_w + \dot{W}_i) \cdot \Delta \tau \quad (2)$$

gdzie:

$w_i$  – wilgotność bezwzględna powietrza wewnętrznego na końcu kroku czasowego [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$w'_i$  – wilgotność bezwzględna powietrza wewn. na początku kroku czasowego [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],

$\dot{W}_w$  – przepływ wilgoci poprzez wymianę powietrza [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

$\dot{W}_i$  – wydajność źródła wilgoci w pomieszczeniu [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ],

pozostałe oznaczenia jak w równaniu 1.

W równaniach bilansowych 1 i 2 występuje wilgotność bezwzględna powietrza. Tymczasem parametrem służącym do opisu stanu powietrza jest wilgotność względna ( $\varphi$ ). Jest ona powiązana z wilgotnością bezwzględną prawem gazowym [Recknagel i Sprengel 1976]:

$$w = 219,81 \frac{\varphi \cdot p_s(\vartheta)}{[101325 - \varphi \cdot p_s(\vartheta)] \cdot (273 + \vartheta)} \quad (3)$$

Gdzie  $p_s(\vartheta)$  jest ciśnieniem cząstkowym pary wodnej w stanie nasycenia. Równań bilansowych 1 i 2 nie można rozwiązać względem  $\vartheta_i$  oraz  $\varphi$  z uwagi na ich wysokie uwikłanie w tych równaniach. Wartości temperatury i wilgotności względnej są więc wstępnie zakładane i kolejno określane na drodze iteracyjnej w danym kroku czasowym. Po spełnieniu równań bilansowych 1 i 2 następuje przejście do następnego kroku czasowego, przy czym końcowa temperatura i wilgotność z poprzedniego kroku stają się wielkościami początkowymi ( $\vartheta'_i, w'_i$ ) w kroku następnym. Dokładność rozwiązania przedstawionego zagadnienia zależy przede wszystkim od właściwego określenia wszystkich składowych równań bilansowych w każdym kroku czasowym. Stopień zgodności poszczególnych składników z rzeczywistymi procesami cieplno – wilgotnościowymi zachodzącymi w budynku inwentarskim określa zakres możliwości i ograniczeń w prognozowaniu mikroklimatu w tych budynkach.

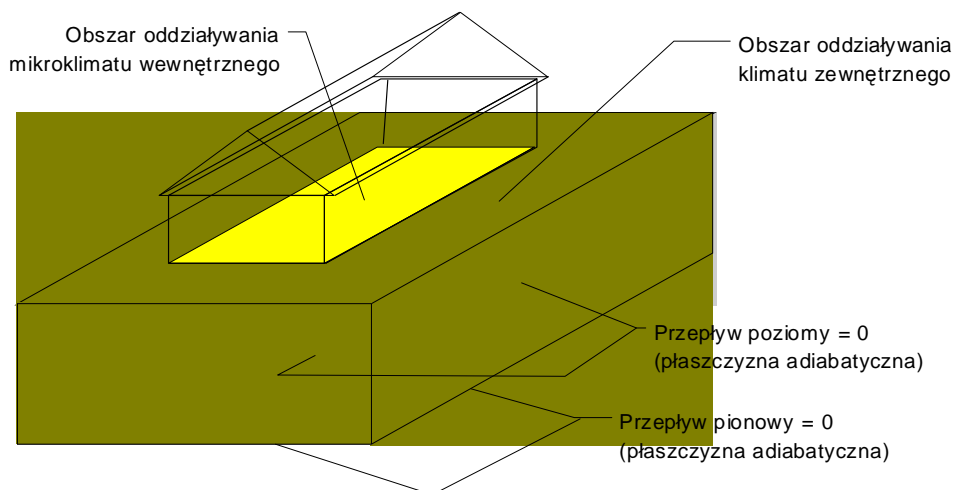
Zagadnienie niestacjonarnego przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne jest obecnie dobrze rozpoznane. Badania nad tymi zjawiskami są od wielu lat prowadzone w odniesieniu do budownictwa mieszkaniowego a uzyskane metody mogą być zastosowane do budownictwa rolniczego [Koczyk 2000]. Jako zewnętrzny warunek brzegowy może zostać wykorzystany tzw. klimat statystyczny stworzony właśnie do symulacji procesów wymiany ciepła i masy w budynkach. W Polsce

dopiero od niedawna rozpoczęto prace nad określeniem klimatu statystycznego dla poszczególnych rejonów kraju. Tym niemniej dostępne są już pliki klimatyczne dla kilku miejscowości (m.in. Warszawy i Krakowa) w formie tzw. „Typowego Roku Odniesienia (TRO)” [Gawin i Kossecka 2002].

Wewnętrznym, źródłem ciepła w budynku jest ciepło wydzielane przez zwierzęta. W literaturze można znaleźć wielkości emisji dla większości zwierząt hodowlanych w zależności od masy ciała i otaczającej temperatury powietrza [Wolski 1988]. Wielkości te nie zostały w Polsce unormowane a wartości podawane przez różne źródła wykazują pewne różnice. Przykładem mogą być emisje ciepła dla drobiu podawane przez różnych autorów [Kettlewel i Moran 1992, Podgórski i Lebedowicz 1995]. W obecnych obliczeniach prognozowania mikroklimatu emisje ciepła i wilgoci będą więc jedynie wielkościami orientacyjnymi.

Ilość powietrza wymianianego zależy od zakładanej w danym kroku czasowym wilgotności względnej powietrza oraz stężenia określonego składnika gazowego (kryterium pary wodnej lub np. CO<sub>2</sub>). Jakkolwiek strumień wymianianego powietrza może być w obliczeniach precyzyjnie wyznaczony, w praktyce problemem pozostaje możliwość dokładnego sterowania wentylacją w istniejących budynkach inwentarskich, w których często dochodzi do niekontrolowanej wymiany powietrza.

Niemal wszystkie budynki inwentarskie posiadają posadzkę położoną na gruncie. Przegroda ta pełni istotną rolę w kształtowaniu warunków termicznych w pomieszczeniach hodowlanych. Dla ustalenia wymiany ciepła ze ściółką i posadzką konieczne jest wyznaczenie pola temperatur ich powierzchni, co wymaga pełnego rozwiązania zagadnienia niestacjonarnego przepływu ciepła w gruncie pod budynkiem i w jego otoczeniu. Obszar przewodzenia ciepła jest trójwymiarowy i teoretycznie nieograniczony. W pewnej odległości od budynku zanika jednak przepływ poziomy oraz na pewnej głębokości przepływ pionowy, co pozwala wyodrębnić z przestrzeni nieograniczonej bryłę o skończonych wymiarach. Naturalnym obszarem przewodzącym ciepło staje się prostopadłościan gruntu z posadzkami, ścianami fundamentowymi i innymi elementami położonymi na gruncie i wewnątrz niego. Oddziaływania zewnętrzne na opisany powyżej system (warunki brzegowe) wyznaczają dwie strefy na górnej powierzchni. Jest to powierzchnia posadzki (ściółki i podłogi) wewnątrz budynku oraz powierzchnia oddziaływania klimatu zewnętrznego poza budynkiem. Na rys. 2 przedstawiono wyodrębniony ośrodek gruntowy, w którym zachodzą przepływy ciepła mające wpływ na jego mikroklimat.



Rys. 2. Model fizyczny i geometryczny ośrodka gruntowego do obliczeń przepływu ciepła

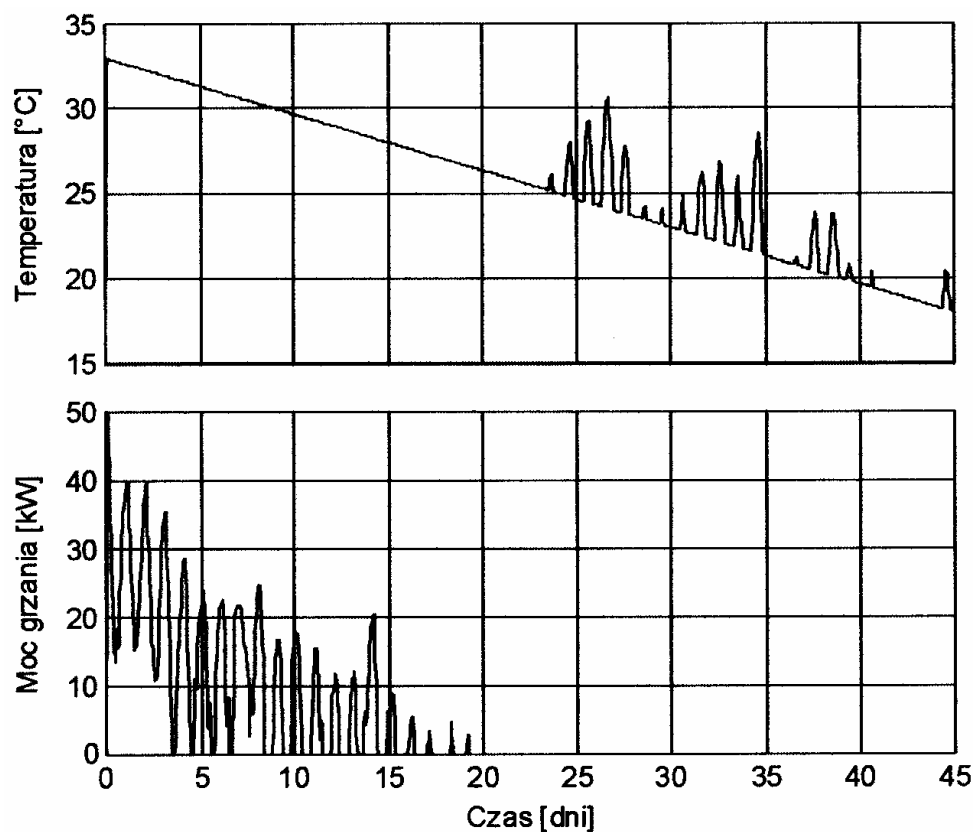
Fig. 2. Physical and geometrical model of soil medium for calculation of heat penetration

Złożoność przepływu ciepła w gruncie i warunków brzegowych powoduje, że pełne rozwiązanie tego zagadnienia nie jest obecnie możliwe. Konieczne staje się przyjęcie założeń upraszczających. W analizie niestacjonarnego, trójwymiarowego przepływu ciepła w ośrodku gruntowym zastosowano metodę bilansów elementarnych [Gdula 1984] zakładając zmienne właściwości fizyczne ośrodka gruntowego w różnych miejscach (ściółka, posadzka, fundamenty, grunt). Wewnątrz budynku założono konwekcyjną wymianę ciepła na powierzchni ściółki (posadzki) oraz bezpośrednią wymianę ciepła z ciałem zwierząt (siedzących lub leżących). Na zewnątrz uwzględniono konwekcyjną wymianę ciepła z powietrzem zewnętrznym z uwzględnieniem działania wiatru.

### Przykład obliczeniowy

Na podstawie opisanych założeń zbudowano model obliczeniowy i program komputerowy o nazwie KLIMAT\_INW do analizy dynamicznego kształtowania się mikroklimatu budynków rolniczych ze szczególnym uwzględnieniem brojlerni [Radoń 2004]. Program poddano walidacji eksperymentalnej w zakresie wyznaczenia temperatury w gruncie oraz walidacji obliczeniowej w zakresie kształtowania się mikroklimatu budynku mieszkalnego z pominięciem przegród stykających

się z gruntem (oprogramowanie obecnie dostępne nie umożliwia uwzględnienia przepływu ciepła w gruncie). Do obliczeń porównawczych użyto programu o nazwie TRNSYS (<http://sel.me.wisc.edu/trnsys>). Nie uzyskano pełnej zgodności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów. Jednakże długoterminowe przebiegi badanych parametrów wykazały duże podobieństwo. Na rysunku 3 pokazano przykładowe wyniki obliczeń temperatury oraz mocy grzewczej dla letniego cyklu produkcyjnego (13.07 – 27.08) w przykładowej brojlerni przy sterowaniu klimatyzacją z kontrolą wilgotności powietrza, uzyskane za pomocą programu KLIMAT\_INW. W obliczeniach wykorzystano klimat statystyczny dla Warszawy.



Rys. 3. Wyniki obliczeń temperatury i mocy grzewczej dla letniego cyklu produkcyjnego (13.07 – 27.08) uzyskane za pomocą programu KLIMAT\_INW

Fig. 3. Calculation results for summer production cycle (13.07 – 27.08) obtained with the aid of KLIMAT\_INW application

## Podsumowanie

Budynek inwentarski stanowi złoŹony system termodynamiczny, w którym poszczególne elementy (zwierzęta, powietrze wewnętrzne, przegrody, ściółka, posadzka i grunt) są sprzęŹone termicznie. Obliczenia kształtowania się mikroklimatu można dokonać poprzez numeryczne rozwiązywanie różnicowych równań bilansowych ciepła i wilgoci powietrza wewnętrznego. Obecna technika obliczeniowa umożliwia zbudowanie programów komputerowych, umożliwiających rozwiązanie tych równań z dowolną dokładnością. Problemem pozostaje jednak właściwe określenie wszystkich składowych równań bilansowych w każdym kroku czasowym.

Obliczenia wykonane za pomocą autorskiego programu komputerowego KLIMAT\_INW wykazały wyniki porównywalne w sensie jakościowym do wyników badań eksperymentalnych. W pełni wiarygodne prognozowanie kształtowania się mikroklimatu budynków inwentarskich będzie jednak możliwe po uściśleniu wielu parametrów, jak np. wielkość wydzielania się ciepła w ściółce, czasowe zmiany jej parametrów fizycznych, czy określenie wielkości emisji ciepła przez zwierzęta w zależności od temperatury i wilgotności powietrza oraz wieku. Wielkości te w chwili obecnej często mogą być tylko oszacowane lub wyznaczone pośrednio.

## Bibliografia

- Gawin D., Kossecka E. 2002. Komputerowa fizyka budowli. Typowy rok meteorologiczny do symulacji procesów wymiany ciepła i masy w budynkach. Drukarnia Wydawnictw Naukowych, Łódź.
- Gdula S. 1984. Przewodzenie ciepła. PWN, Warszawa.
- Kettlewel P.J., Moran P. 1992. A study of heat production and heat loss in crated broiler chickens: a mathematical model for a single bird. *British Poultry Science*, 33, 139–252.
- Koczyk H. 2000. Podstawy projektowania cieplnego i termomodernizacji budynków. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań.
- Podgórski W., Lebedowicz W. 1995. Wytwarzanie ciepła sensybilnego przez brojlery kurze. *Problemy Inżynierii Rolniczej*, 3, 87–95.



Radoń J. 2004. Model obliczeniowy i analiza dynamicznego kształtowania się mikroklimatu budynków rolniczych na przykładzie brojlerni. Zesz. Nauk. AR w Krakowie, nr 410, ser. Rozprawy, 299.

Recknagel H, Sprenger E. 1976. Ogrzewanie i klimatyzacja – poradnik. Arkady, Warszawa.

Wolski L. 1988. Mikroklimat w budynkach inwentarskich. PWN, Warszawa.

## **FORECASTING MICROCLIMATE DEVELOPMENT IN LIVESTOCK BUILDINGS – POSSIBILITIES AND LIMITATIONS**

### **Summary**

The major heat and humidity related processes have been described, which take place in livestock halls. It has been found that determining the basic parameters of microclimate in course of time can be obtained by developing and solving heat and moisture content balance equations in short periods. The accuracy of the solution is decided by the possibilities and limitations of determining reliable individual components of balance equations.

**Key words:** microclimate, livestock halls, forecasting