

УДК 631.227 : 628.8

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ВОЗДУХООБМЕНЕ В ПТИЧНИКАХ

Татьяна ЛОХВИНСКАЯ

Приднестровский Государственный Университет им.Т.Г. Шевченко, Республика Молдова

Abstract. This work considers the regularities of the heat transfer process at air exchange in poultry houses with detailed boundary conditions and proposes a physico-mathematical model of heat and moisture processes with the parameters of “air and bird” subsystem. It also establishes the characteristics determining the stability of the thermodynamic system: the indicator of the indoor convective heat exchange and the density of the convective heat flux.

Key words: Poultry houses; Heat transfer; Convective heat flux; Radiant heat flux; Model.

Реферат. Рассматриваются закономерности процесса теплопередачи при воздухообмене в птичниках с детализацией граничных условий и предложена физико-математическая модель тепловлажностных процессов с параметрами подсистемы ”воздух и птица”. Установлены характеристики, определяющие устойчивость термодинамической системы: показатель конвективного теплообмена помещения, плотность конвективного теплового потока.

Ключевые слова: Птичники; Теплообмен; Конвективный тепловой поток; Лучистый тепловой поток; Модель.

ВВЕДЕНИЕ

Решение тепломассообменных задач основывается на использовании приближенной математической модели тепловоздушных процессов в помещениях. Началом создания указанных моделей были работы Л.Н. Ануфриева, Г.М. Позина (1974) и А.М. Гримитлина (2002). Авторы использовали метод математического моделирования для решения различных задач строительной теплофизики сельскохозяйственных зданий. В полученных решениях внутренний объем помещений рассматривался как однородный. Необходимо отметить работы В.Н. Богословского, составившего систему уравнений, которая описывает теплофизические процессы в помещении применительно к общественным зданиям. Известные математические модели, разработанные Малявиной Е.Г. (1977) и Табунщиковым Ю.А. (1986), исходят из постановки задачи теплообмена в помещении, которая базируется на общих закономерностях теплопередачи с детализацией граничных условий и исходных данных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Модель с сосредоточенными параметрами подсистемы «воздух и птица» имеет ряд допущений в постановке задачи: поверхности в помещении рассматриваются как изотермические без источников и стоков тепла; температура воздуха характеризуется равномерным распределением по всему объему помещения; источники и стоки тепла в помещении являются сосредоточенными, диффузными.

Допущения позволяют считать суммарный тепловой поток, поступивший в помещение, распределенным по поверхностям ограждений пропорционально их площади. В систему уравнений входят:

- уравнение баланса конвективного тепла в воздух

$$\frac{1}{3,6} V(c\rho)_e \frac{dt_e}{d\tau} = \sum \alpha_{ki} F_i (t_i - t_e) + \frac{1}{3,6} L(c\rho)_e (t_{np} - t_e) + Q_k(\tau) \quad (1)$$

- уравнение теплопроводности на поверхностях ограждений и оборудования:

$$\frac{\partial t_i}{\partial t} = a \frac{\partial^2 t_i}{\partial x^2} \quad (2)$$

- уравнение теплообмена на поверхностях ограждений и оборудования

$$\lambda \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \alpha_{ki}(t_i - t_e) + \sum \alpha_{li,j}(t_i - t_j) + q_l(\tau) \quad (3)$$

где t_i, t_j - температура поверхности ограждения, температура приточного воздуха, °С;

F_i - площадь i -той поверхности ограждений, м²;

V - объем помещения, м³;

c - удельная теплоемкость, Дж/кг °С;

ρ - плотность воздуха, кг/м³;

L - расход воздуха, м³/ч;

α_k, α_l - коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена на поверхностях Вт/м²°С;

λ - коэффициент температуропроводности поверхности слоя ограждения м²/°С;

$Q_k(\tau)$ - конвективный тепловой поток, поступающий в помещение, Вт;

$q_k(\tau)$ - плотность лучевого теплового потока, поступающего в помещение Вт/м².

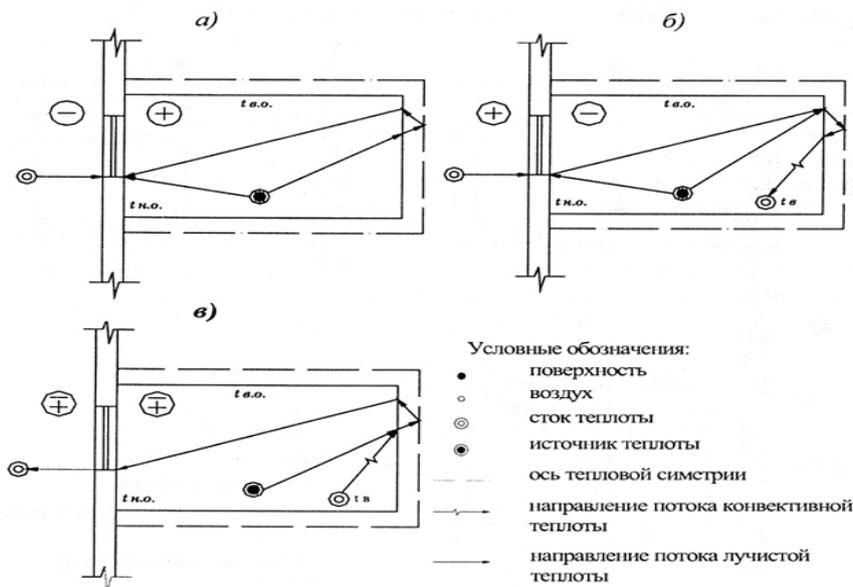


Рисунок 1. Схемы лучистого теплообмена в помещении

Коэффициент лучистого обмена для поверхности, окруженной другими поверхностями в пределах температур, поддерживаемых в переходной период, определяется по следующей зависимости:

$$\alpha_{л} = 5,7 \varepsilon_{nv} \cdot \varphi \cdot v \quad (4)$$

где ε - приведенная степень излучения поверхности;

φ - коэффициент облученности поверхностей;

v - корректирующий множитель [5,2,3].

Источниками лучистого тепла являются поверхности внутреннего оборудования и поглощенное тепло солнечной радиации, поступающее в помещение через ограждение. В зависимости от направления потоков лучистого тепла, можно рассматривать несколько принципиальных схем теплообмена для установившегося теплового режима (рис.1).

Для холодного периода года ($t_{н.о.} \leq t_{в.о.}$) схема обмена тепла представляет собой следующую картину (рис.1а) [12]: сток лучистого тепла осуществляется на поверхности наружных ограждений. В теплое время ($t_{н.о.} \geq t_{в.о.}$) сток теплоты осуществляется конвекцией в воздух помещения (рис.1б). В переходный период года ($t_{в.о.} \geq t_{в.} \geq t_{н.о.}$) сток теплоты осуществляется как на наружной поверхности, так и в воздух помещения (рис.1в)). В зависимости от температуры приточный воздух может быть наряду с наружной поверхностью стоком теплоты.

Предложенная схема теплообмена справедлива при рассмотрении конвективных тепловых по-

токов при установившемся тепловом режиме.

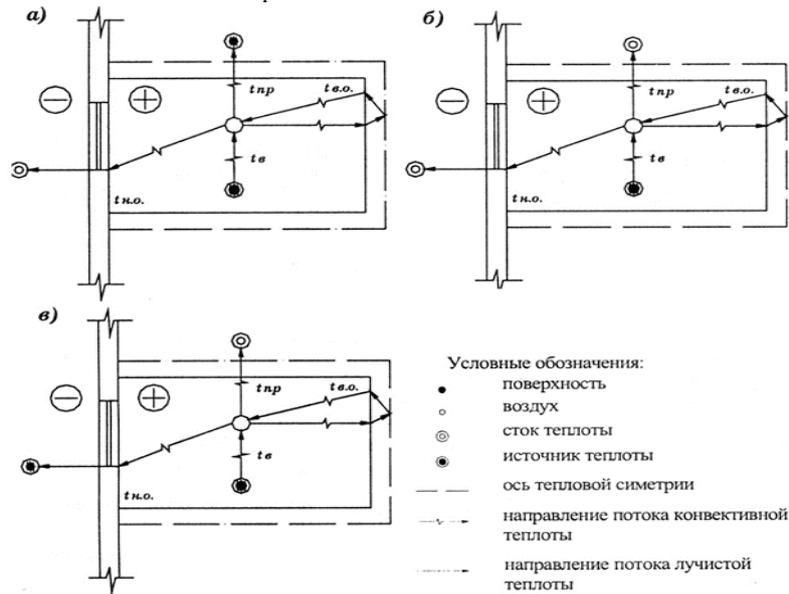


Рисунок 2. Схемы конвективного теплообмена в помещении

В холодный период года схемы конвективного теплообмена представляют собой картину, где стоком теплоты является наружная поверхность (рис. 2). В переходный период года сток конвективного тепла осуществляется в приточный воздух и на наружные поверхности ограждений (рис. 2в). В процессе нестационарного теплообмена в течение непродолжительного времени возможен переход от одной схемы к другой. Предложенные схемы физической интерпретации теплообмена позволяют обобщить тепловые характеристики помещения, вытекающие из уравнения конвективного теплообмена в помещении:

$$\sum Q_k = \sum F_i \alpha_k (t_a - t_i) \quad (5)$$

На основании принятых допущений, полный сток конвективной теплоты представлен в следующем виде:

$$\sum Q_k = \alpha_k \sum F_i \quad (6)$$

где $\sum F_i$ - сумма площадей поверхностей помещения, м².

Плотность конвективного теплового потока для единичной поверхности определяется выражением:

$$\sum F_i \alpha_k (t_a - t_i) = \sqrt[4]{q_k} \cdot \sum F_i A_i^{0,75} \cdot \left(t_a - \frac{\sum F_i t_i}{\sum F_i} \right) \quad (7)$$

где $A_i^{0,75}$ - коэффициент направления потока теплоты, проходящего через поверхность, для вертикальных поверхностей – 1,46; для горизонтальных – 1,12 ... 1,78.

В постановке задачи для пары горизонтальных поверхностей одинаковой площади (пол, потолок) и допущений 1), 2) будет справедливо равенство

$$1,12 F_{\text{пол}} \cdot t_1 + 1,78 F_{\text{пот}} \cdot t_2 \cong 1,46 F_{\text{верт}} \cdot (t_1 + t_2) \quad (8)$$

где $F_{\text{пол}}$ - площадь горизонтальной поверхности помещения, м²;

$F_{\text{верт}}$ - площадь горизонтальной поверхности помещения, м².

С учетом радиационной температуры, представляющей собой усредненную по площади температуру всех поверхностей, обращенных в помещение, [7,8] уравнение 8 приобретает вид

$$\sum F_i \alpha_{ki} (t_b - t_i) = \sqrt[4]{q_k} \cdot 1,46 \sum F_i \left(t_b - \frac{\sum F_i t_i}{\sum F_i} \right) \quad (9)$$

где $t_R = \frac{\sum F_i t_i}{\sum F_i}$ - радиационная температура, °С, значение которой с допущениями [10] рав-

венства ее средней температуре воздуха в помещении можно записать $t_R \cong t_i$

t_i - температура i -той поверхности, °С;

F_i - площадь i -той поверхности ограждения, м².

Из формулы (7) можно выделить величину Λ , которая является показателем конвективного теплообмена помещения

$$\Lambda = 1,46 \cdot \sqrt[4]{\frac{Q_k}{\sum F_i}} \sum F_i = \alpha_k \sum F_i \quad (10)$$

Уравнение 10 является показателем конвективного теплообмена помещения. В дифференциальном уравнении баланса конвективного тепла член Q_k представляет собой прерывистую во времени функцию, которая может быть представлена в виде ряда Фурье:

$$Q_k(\tau) = Q_k \left(m + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} \sin \pi m k \cdot \cos \omega k \tau \right) \quad (11)$$

где Q_k - максимальное значение прерывистого конвективного теплового потока;

Δt - продолжительность теплового воздействия, час;

$$m = \frac{\Delta t}{T}$$

k - порядковый номер члена тригонометрического ряда;

ω - частота тепловых колебаний, 1/час, $\omega = 2\pi/T$;

T - период колебаний, час;

τ - время, исчисляемое от середины продолжительности тепlopоступления.

Радиационную температуру можно представить в виде тригонометрического ряда:

$$t_R = \frac{\sum F_i t_i}{\sum F_i} = t_{R,0} + \frac{A}{Y_{\Pi}} \cos(\omega \tau - \frac{\pi}{4}) \quad (12)$$

где $Y_{\Pi} = \frac{(\sum F_i)^{0,75}}{\sum \frac{F_i}{S_i}}$ - показатель теплоусвоения помещения, Вт/°С.

Температуру i -той поверхности, обращенной в помещение можно представить в следующем виде:

$$t_i = t_{i,0} + \frac{A_i}{S_i \sqrt{2}} \cos(\omega \tau - \frac{\pi}{4}) \quad (13)$$

где $t_{i,0}$ - среднее за период T значение температуры;

A_i - амплитуда колебаний плотности теплового потока, Вт/м²;

S_i - коэффициент теплоусвоения материала поверхностного слоя, $S_i = 1,19$ Вт/м² °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Обобщая уравнение баланса конвективного тепла в воздух (1), показатель конвективного теплообмена помещения (10) и формулу для члена Q_k дифференциального уравнения баланса конвектив-

ного тепла (11), можно представить обобщенное выражение температуры воздуха для времени τ :

$$t_e = \left\{ t_{R,0} + \frac{Q_k m}{\Lambda_n} + Q_k \left(\frac{\Omega_e}{\Lambda_n} + \frac{\Omega_K}{Y_n} \right) \right\} - \left\{ e^{pt} \left[t_{R,0} + \frac{Q_k m}{\Lambda_n} + \left(\frac{\Omega_{eH}}{\Lambda_n} + \frac{\Omega_K}{Y_n} \right) + e^{-pt} \right] \right\} + \{ t_{eH} \} \quad (14)$$

Выражение (14) состоит из трех составляющих:

- первая составляющая выражения – уравнение для температуры воздуха для времени τ ;
- вторая дает решение для нулевого момента времени и сокращается с третьей составляющей.

Таким образом, решение уравнения 14 принимает следующий вид:

$$t_e = t_{R,0} + \frac{Q_k m}{\Lambda_n} + Q_k \left(\frac{\Omega_e}{\Lambda_n} + \frac{\Omega_R}{Y_n} \right) = t_{e,0} + \frac{Q_k m}{\Lambda_n} + Q_k \left(\frac{\Omega_e}{\Lambda_n} + \frac{\Omega_R}{Y_n} \right) \quad (15)$$

$$t_e = t_{e,0} + \frac{Q_k m}{\Lambda_n} + Q_k \left(\frac{\Omega_e}{\Lambda_n} + \frac{\Omega_R}{Y_n} \right) \quad (16)$$

где Ω_e - коэффициент прерывистости для температуры воздуха:

$$\Omega_e = \frac{2}{p} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin pmk}{k\sqrt{k(1+p^2k^2)}} \cdot (\cos wkt + \bar{p}k \sin wkt) \quad (17)$$

Ω_R - коэффициент прерывистости радиационной температуры:

$$\Omega_R = \frac{2}{p} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin pmk}{k\sqrt{k(1+p^2k^2)}} \cdot \left[\cos \left(wkt - \frac{p}{4} \right) + \bar{p}k \sin \left(wkt - \frac{p}{4} \right) \right] \quad (18)$$

Изменение температуры поверхностей t_b во времени при оптимальных скоростях потока в помещении птичника размерами 48*18*6 м с учетом коэффициентов прерывистости приведена в таблице 1. Коэффициент теплоусвоения слоя бетона $S_1=1,19$ Вт/м °С.

Таблица 1. Расчет температуры поверхностей помещения птичника

Время, ч	10	11	12	13	14	15	16
I_{max} , Вт/ч	136	108	98	87	81	81	80
A_i , Вт/м ²	10,833	9,727	9,332	8,8975	8,660	8,660	8,621
$t_{R,0}$, °С	6,435	5,7775	5,725	5,2833	5,1453	5,1407	5,0985
При скорости потока воздуха $v=2,5$ м/с							
$\frac{Q_k m}{\Lambda_n}$	4,5384	4,7304	4,7457	4,8745	4,9148	4,9161	4,9284
$Q_k \left(\frac{\Omega_e}{\Lambda_n} + \frac{\Omega_R}{Y_n} \right)$	15,678	15,639	15,631	15,624	15,605	15,619	15,623
t_R , °С	26,6514	26,1469	26,1017	25,7813	25,6651	25,6758	25,6499
При скорости потока воздуха $v=4,0$ м/с							
$\frac{Q_k m}{\Lambda_n}$	4,5161	4,6424	4,6433	4,7645	4,7748	4,7761	4,7284
$Q_k \left(\frac{\Omega_e}{\Lambda_n} + \frac{\Omega_R}{Y_n} \right)$	14,973	15,138	15,121	15,225	15,305	15,219	15,223
t_b , °С	25,9241	25,5579	25,4893	25,2728	25,2251	25,1358	25,0499

Полученная графическая зависимость температуры поверхностей t_b (радиационной температуры поверхностей) (рис.3) выявляет явный характер конвективной составляющей при формировании температурных колебаний в помещении птичника.

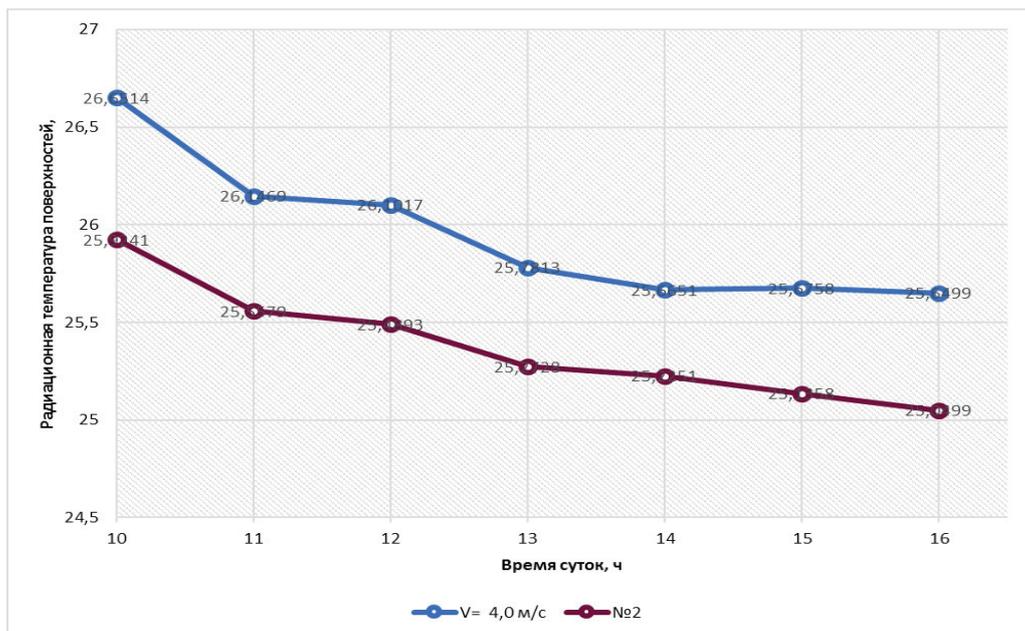


Рисунок 3. Изменение радиационной температуры поверхностей в течении суток

ВЫВОДЫ

1. Систематизированы схемы теплообмена для конвективных и лучистых тепловых потоков при установившемся тепловом режиме и разработана физико-математическая модель тепловлажностных процессов, а так же выявлены закономерности процесса теплопередачи с детализацией граничных условий.

2. Установлены характеристики, определяющие устойчивость термодинамической системы: показатель конвективного теплообмена помещения, плотность конвективного теплового потока.

3. Определены функциональные зависимости, позволяющие определить относительный показатель теплоусвоения помещения (формула 12) и коэффициент прерывистости для температуры воздуха (формула 17).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. АНУФРИЕВ, Л.Н., КОЖИНОВ, И.А., ПОЗИН, Г.М. (1974). Теплофизические расчеты сельскохозяйственных и производственных зданий. Москва: Стройиздат. 214 с.
2. БОГОСЛОВСКИЙ, В.Н. (1982). Строительная теплофизика. Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Москва: Высшая школа. 368 с.
3. БОГОСЛОВСКИЙ, В.Н. (1982). Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Уч. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа. 415 с.
4. БОГОСЛОВСКИЙ, В.Н. (1979). Тепловой режим здания. Москва: Стройиздат. 248 с.
5. БОГОСЛОВСКИЙ, В.Н. (1970). Строительная теплофизика. Москва: Высшая школа. 286 с.
6. ГРИМИТЛИН, А.М. (2002). Энергосбережение в системах промышленной вентиляции: Дис. канд. техн. наук. 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Санкт-Петербург: «ЭКОЮ-РУС-ВЕНТО». 375 с.
7. КУВШИНОВ, Ю.Я. (2010). Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий. Москва: Из-во Ассоциации строительных вузов. 320 с.
8. ЛОХВИНСКАЯ, Т.И. (2011). Количественная оценка параметров микроклимата помещений. В: Вестник Приднестровского государственного университета. Серия: физико-математические и технические науки. Тирасполь, №3 (39), с. 114-116.
9. ЛОХВИНСКАЯ, Т.И. (2011). Некоторые аспекты формирования воздушной среды обитания. В: Сборник работ «Экологическое образование и охрана окружающей среды. Технические университеты в формировании единого научно-технологического и образовательного пространства СНГ», МГТУ им.Н.Э. Баумана, г. Москва, с. 61-66.

10. МАЛЯВИНА, Е.Г. (1977). Нестационарный тепловой режим вентилируемых и кондиционируемых помещений в летний период года: Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва. 20 с.
11. СЕРГЕЕВ, В.А. (1977). Выращивание и содержание племенной птицы. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Колос. 320 с.
12. ТАБУНЩИКОВ, Ю.А., ХРОМЕЦ, Д.Ю., МАТРОСОВ, Ю.А. (1986). Тепловая защита ограждающих конструкций. Москва: Стройиздат. с. 235.
13. КУВШИНОВ, Ю.Я. (2010). Энергосбережение в системе обеспечения микроклимата зданий. М.: Из-во Ассоциации строительных вузов. 320 с.

Data prezentării articolului: 02.10.2017

Data acceptării articolului: 11.11.2017