

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКЛІМАТУ В ТВАРИННИЦЬКОМУ ПРИМІЩЕННІ З ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРОМ

В. О. Грищенко, кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Б. І. Котов, доктор технічних наук, професор

Ю. І. Панцир, кандидат технічних наук, доцент

І. Д. Герасимчук, кандидат технічних наук, доцент

Подільський державний аграрно-технічний університет

E-mail: vlgr@nubip.edu.ua

Анотація. *Визначена актуальність досліджень варіантів використання теплообмінного обладнання для утилізації теплоти витяжного повітря тваринницьких приміщень. Проаналізовано, що для ефективного функціонування теплоутилізаторів необхідно не тільки вибрати оптимальні конструкційні параметри, але й реалізувати раціональні енергоефективні режими. Визначено, що для синтезу системи автоматичного керування тепловологісним режимом у приміщенні необхідно визначити динамічні характеристики об'єкту керування на основі математичної моделі динамічних режимів. Наведено аналіз існуючих систем утилізації тепла та зазначено, що вони для свого опису мають тільки аналітичні залежності, що описують стаціонарні режими теплоутилізаторів, які визначають статику теплових та масообмінних (конденсація вологи на поверхні) процесів. У розглянутих роботах сумісне функціонування теплоутилізатора та тваринницького приміщення в нестационарному режимі не розглядається. На основі аналізу тепло-вологісного режиму тваринницького приміщення, вентиляційна система якого обладнана теплоутилізатором рекуперативного типу, складено математичний опис у вигляді диференціальних рівнянь теплового і матеріального балансу тваринницького приміщення з теплоутилізаційною системою вентиляції. Розроблено математичні моделі теплового і матеріального балансу для тваринницького приміщення у вигляді системи трьох диференціальних рівнянь, які містять два взаємопов'язані параметри: температуру і вологовміст повітря. Але оскільки параметри повітря в приміщенні з утилізатором теплоти відпрацьованого вентиляційного повітря залежать від параметрів і режиму функціонування теплообмінника, розроблено рівняння теплового режиму приміщення з рівняннями, які визначають нестационарний тепловий режим теплоутилізатора. Сформульована математична модель, яка описує нестационарний процес теплообміну в системі створення мікроклімату, може бути*

використана для обґрунтування конструктивних та режимних параметрів теплоутилізатора незалежно від конструктивних особливостей. Математична модель визначає перехідний процес у системі «приміщення-теплоутилізатор» та може бути використана при створенні системи автоматичного керування температурно-вологісними режимом.

Ключові слова: *тваринницьке приміщення, мікроклімат, теплоутилізатор, тепловий режим, математична модель*

Актуальність. Одним із ефективних заходів зниження енергозатрат на виробництво продукції тваринництва є використання відпрацьованої, викидної теплоти вентиляції приміщень для утримання тварин та птиці. Практикою встановлено, що застосування теплообмінників для передачі теплоти витяжного повітря припливному дає змогу використати до 70 % біологічної теплоти тварин. Для утилізації теплоти витяжного повітря широко використовують теплообмінне обладнання (рекуперативні, регенеративні теплообмінники різного конструктивного виконання). Для ефективного функціонування теплоутилізаторів необхідно не тільки вибрати оптимальні конструкційні параметри, але й реалізувати раціональні енергоефективні режими, які може забезпечити система автоматичного керування. Для синтезу системи автоматичного керування тепловологісним режимом у приміщенні необхідно визначити динамічні характеристики об'єкту керування на основі математичної моделі динамічних режимів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним типом теплоутилізаторів, які використовуються для утилізації відпрацьованих вентиляційних потоків і теплоносіїв, є рекуперативні теплообмінники [1-3], параметри призначення яких регламентовані в [3]. Методи досліджень і отримані результати визначення характеристик теплообмінників висвітлено в роботах [4-8], але тільки для усталених режимів. Дослідженням рекуперативних теплообмінників присвячено роботи [9, 10], в яких визначені математичні залежності роботи утилізаторів в усталеному режимі. У проаналізованих працях [5-8, 10] розрахункові формули та аналітичні залежності описують стаціонарні режими теплоутилізаторів, які визначають статику теплових та масообмінних (конденсація вологи на поверхні) процесів. Сумісне

функціонування теплоутилізатора та тваринницького приміщення в нестационарному режимі не розглядається.

Мета дослідження - сформулювати математичний опис температурно-вологісного режиму тваринницького приміщення з теплоутилізаційною системою вентиляції.

Матеріали і методи дослідження. Специфіка досліджуваного об'єкта обумовлює доцільність аналітичного методу досліджень без врахування конкретизації конструктивних особливостей теплообмінника-утилізатора.

Результати досліджень та їх обговорення. Розглядається тепловологісний режим тваринницького приміщення, вентиляційна система якого обладнана теплоутилізатором рекуперативного типу (рис. 1, а).

При складанні математичного опису у вигляді диференціальних рівнянь теплового і матеріального балансу зроблено такі загальноприйняті спрощення і припущення:

- повітря в об'ємі приміщення добре перемішується і рівномірно омиває поверхні тепло- і масообміну;

- теплофізичні параметри елементів конструкцій, повітря, а також значення коефіцієнтів тепло- і масообміну в часі не змінюються і не залежать від температури;

- вплив сонячної радіації на зовнішні поверхні враховується при визначенні умовної температури зовнішнього повітря за формулою: $t_z = t_{z0} + \sigma I / \alpha_z$, (де t_{z0} – температура зовнішнього повітря, °С; I – інтенсивність сонячної радіації, Вт/м²; $\sigma = 0.8$ – коефіцієнт поглинання сонячної радіації; α_z – коефіцієнт теплообміну зовнішньої поверхні з повітрям, температура атмосферного повітря змінюється за гармонічною залежністю в часі $I = t_0 - A_0 \cos \omega \tau$;

- температура технологічного обладнання, поверхні рідини дорівнює температурі повітря в приміщенні, а теплоємність обладнання додається до теплоємності повітря.

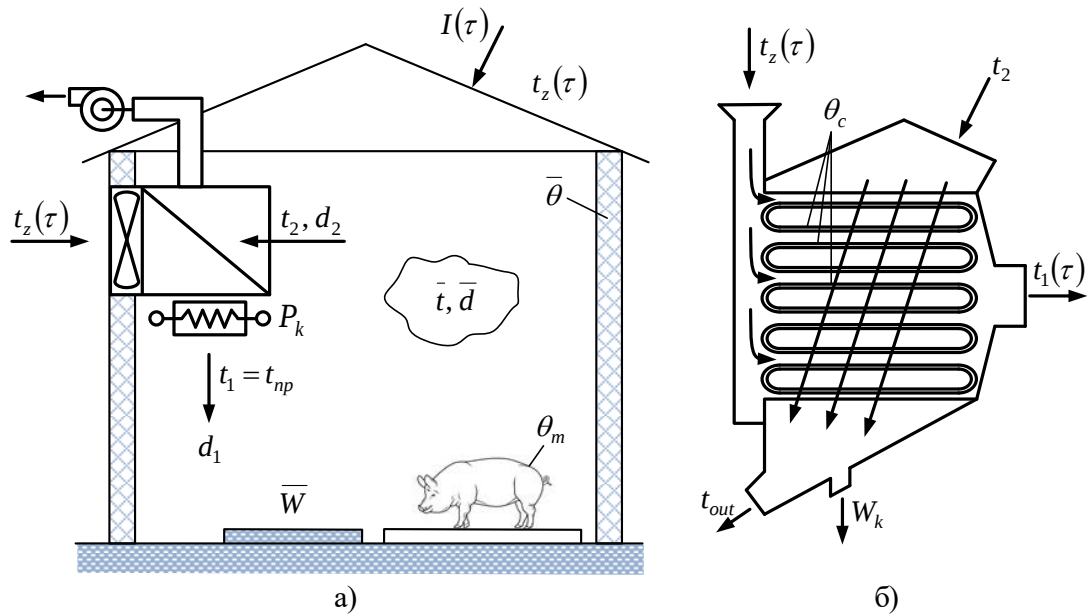


Рис. 1. Схеми розрахунків параметрів тваринницького приміщення (а) та теплоутилізатора (б)

Оскільки математичні моделі призначені для вирішення задач автоматизації керування інженерно досконалого об'єкта, в якому системи теплоповітропостачання забезпечують рівномірний розподіл температури повітря в об'ємі приміщення, то використання моделей із зосередженими параметрами буде виправдане.

Рівняння теплового балансу для тваринницького приміщення за елемент часу $d\tau$ має вигляд:

$$dQ_1 + dQ_m = dQ_n + dQ_2 + dQ_v + dQ_{ov}, \quad (1)$$

$$dQ_{ov} = dQ_o + dQ_z, \quad (2)$$

де dQ_1 – кількість теплоти введена в приміщення (за час $d\tau$) з припливним повітрям (або нагрітим в калорифері), Дж; dQ_m – кількість теплоти, виділеної тваринами, Дж; dQ_n – кількість теплоти, яка пішла на нагрівання повітря в приміщенні, Дж; dQ_2 – кількість теплоти, відведеної з приміщення з відпрацьованим повітрям, Дж; dQ_v – кількість теплоти на випаровування вологи з відкритих зволжених поверхонь у приміщенні, Дж; dQ_{ov} – теплота передана від повітря до внутрішніх поверхонь

огороження, Дж; dQ_o – теплота, яка пішла на нагрівання огороження, Дж; dQ_z – теплота, передана від поверхні огороження у навколишнє середовище, Дж.

Складові теплового балансу визначаються очевидними співвідношеннями, а саме:

$$dQ_1 = G_v c_p t_1; dQ_2 = G_v c_p t_2; dQ_n = m_v c_p dt; dQ_v = r_0 \beta F_w (at + c - bd_v);$$

$$dQ_{ov} = \alpha_v F_v (\bar{t} - \theta) d\tau; dQ_o = m_o c_o d\theta; dQ_m = (a_1 + b_1 \bar{t}) q_m N; dQ_z = \alpha_z F_z (\theta - t_z);$$

де G_v, c_p – витрата повітря і його питома теплоємність, відповідно, кг/с, Дж/(кг·°C); $t_1, t_2, \bar{t}$ – температура припливного і відпрацьованого повітря та його середнє значення, °C; m_v – маса повітря в приміщенні ($m_v = V_{np} \rho_v$, V_{np} – об'єм приміщення, м³; ρ_v – густина повітря, кг/м³), кг; F_p, β – відкрита площа поверхні рідини і коефіцієнт випаровування відповідно, м², кг/(с·м²); α_v, α_z – коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої і зовнішньої поверхонь огороження до повітря, Вт/(м²·°C); F_v, F_z – внутрішня і зовнішня поверхня огороження, м²; r_0 – питома теплота пароутворення, Дж/кг; m_o, c_o – маса і питома теплоємність огороження, відповідно кг, Дж/(кг·°C); θ – температура огороження, °C; τ – час, с; q_m – норма тепловиділення одною твариною, Дж/гол.; N – кількість тварин в приміщенні, гол.; a, b, c, a_1, b_1 – постійні (емпіричні) коефіцієнти лінеаризації нелінійних залежностей $P_n(t), Q_m(t)$.

Підставляючи значення складових теплового балансу в рівняння (1), (2), отримаємо диференціальні рівняння динаміки температурного режиму у вигляді:

$$m_v c_p \frac{dt_2}{d\tau} = G_v c_p (t_1 - t_2) + (a_1 + b_1 \bar{t}) q_m N - r_0 \beta F_w (at + c - bd_v) - \alpha_v F_v (\bar{t} - \theta), \quad (3)$$

$$m_o c_o \frac{d\theta}{d\tau} = \alpha_v F_v (\bar{t} - \theta) - \alpha_z F_z (\theta - t_z) \quad (4)$$

де $t_z = t_0 - T_A \cos \omega \tau$ – температура атмосферного повітря; t_0 – середня добова

температура; $\omega = \frac{\pi}{12 \cdot 3600}$ – частота коливань температури повітря.

Динаміка тепло-вологообміну в тваринницькому приміщенні визначена з рівняння матеріального балансу:

$$dW_v = dW_1 - dW_2 + dW_3 + dW_4 + dW_5, \quad (5)$$

де dW_v – кількість води, яка пішла на збільшення вологовмісту повітря, кг/с; dW_1 – потік води (водяної пари), що надходить у приміщення з припливним повітрям, кг/с; dW_2 – кількість води, що видаляється з приміщення в процесі вентиляції, кг/с; dW_3 – кількість води, що надходить в приміщення від тварин (воловиділення тварин), кг/с; dW_4 – потік води від випаровування змочених поверхонь, кг/с; dW_5 – потік води від зволожуючих пристроїв (зволожувач повітря), кг/с.

Складові матеріального балансу визначаються відомими співвідношеннями і формулами, а саме:

$$dW_v = \rho_v V_v dd_v; dW_1 = \rho_v V_v n d_1 10^{-3} d\tau; dW_2 = \rho_v V_v n d_2 10^{-3} d\tau; \\ dW_3 = (a_2 + b_2 t) q_w N d\tau; dW_4 = 1.2 \beta F_w (P''(t_v) - P_v \bar{d}); dW_5 = G_w d\tau;$$

Де V_v – об'єм приміщення, м³; n – кратність повітрообміну; $G_v = \rho_v V_v n$ – витрата вентиляційного повітря, кг/с; d_1, d_2 – вологовміст припливного повітря і на виході приміщення, г/кгс.п; $\bar{d} = 0.5(d_1 + d_2)$ – вологовміст повітря в приміщенні, г/кгс.п; a_2, b_2 – коефіцієнти лінеаризації залежності $W_3(t)$; q_w – питомі волого виділення тваринами, кг/с; G_w – продуктивність зволожувача повітря, кг/с.

Підставляючи значення складових теплового балансу в рівняння (5), отримаємо математичну модель динаміки змінності вологовмісту повітря в приміщенні:

$$m_v \frac{dd}{d\tau} = G_v (d_1 - d_2) + (a_2 + b_2 \bar{t}) q_w N + \beta F_w (a - b \bar{d} + c) + G_w. \quad (6)$$

Таким чином, динаміка тепловологісних режимів тваринницького приміщення може бути визначена системою трьох диференціальних рівнянь (3), (4), (6), які містять два взаємопов'язані параметри: температуру і вологовміст повітря.

Оскільки параметри повітря в приміщенні з утилізатором теплоти відпрацьованого вентиляційного повітря залежать від параметрів і режиму функціонування теплообмінника, необхідно рівняння теплового режиму приміщення доповнити рівняннями, які визначають нестационарний тепловий режим теплоутилізатора.

Динаміку теплового режиму теплоутилізатора розглянемо на прикладі найбільш розповсюдженого типу теплообмінників – рекуператор «повітря-повітря», схема якого наведена на рис. 1, б. Оскільки розглядається динамічний режим функціонування системи: «тваринницьке приміщення-теплоутилізатор», для математичного опису використовуємо математичну модель (теплообмінник із зосередженими параметрами у вигляді системи рівнянь (5).

Відповідно до розрахункової схеми і типових припущень математичну модель теплового режиму теплоутилізатора в тваринницькому приміщенні можна представити системою диференціальних рівнянь, які визначають зміну в часі параметрів повітря на виході з припливного та викидного (відпрацьованого повітряного) каналів. Розв'язок рівнянь системи дозволить визначити параметри припливного повітря $t_1(\tau)$, відпрацьованого вентиляційного повітря $t_2(\tau)$ та повітря в приміщенні $\bar{t}(\tau) = 0.5(t_1(\tau) + t_2(\tau))$.

Для каналу відпрацьованого вентиляційного повітря в приміщення:

$$m_1 c_1 \frac{dt_{out}}{d\tau} = G_{out} c_1 (t_2 - t_{out}) - \alpha_z F_z (t_{out} - \theta_c) - r_0 \beta F_z (d_2 - d_c''(\theta)); \quad (7)$$

$$m_c c_c \frac{d\theta_c}{d\tau} = \alpha_z F_z (t_{out} - \theta_c) - \alpha_v F_v (\theta_c - t_{out}) + r_0 \beta F_z (d_2 - d_c''(\theta)). \quad (8)$$

Для припливного (свіжого) вентиляційного повітря:

$$m_2 c_2 \frac{dt_1}{d\tau} = G_{in} c_2 (t_z - t_1) + \alpha_v F_v (\theta_c - t_1) + P_k; \quad (9)$$

$$m_k c_k \frac{d\theta_k}{d\tau} = -\alpha_k F_k (\theta_k - t_{out}) - \alpha_k F_k (\theta_k - 0.5t_1 + 0.5t_2); \quad (10)$$

$$d_c''(\theta) = a\theta_c + b; \quad t_z(\tau) = t_0 - A \cos \omega \tau.$$

У рівняннях (7) – (10) позначено: $t_{out}, t_2, t_1, t_z, t_{np}$ – відповідно температура повітря на вході в теплоутилізатор з тваринницького приміщення, температура свіжого нагрітого повітря на вході в тваринницьке приміщення; t_{np} – температура повітря після додаткового нагрівання в калорифері (P_k); θ_c – температура стінок трубчастого каналу; θ_k – температура корпусу (зовнішнього огороження) теплоутилізатора; G_{out}, G_{in} – масові витрати відпрацьованого та припливного повітря; c_1, c_2, c_c – питома теплоємність відпрацьованого, припливного теплоносія та матеріалу стінок; α_z, α_v – коефіцієнти теплообміну зовнішньої та внутрішньої поверхні труб з повітрям; α_k – коефіцієнт теплообміну поверхні корпусу з повітрям приміщення; F_z, F_v, F_k – зовнішня, внутрішня поверхні труб та поверхня корпусу; β – коефіцієнт масообміну при конденсації; r_0 – питома теплота конденсації; $d_c''(\theta)$ – вологовміст насиченої пари (плівки на поверхні труб при температурі стінки); d_2 – вологовміст відпрацьованого повітря на вході в теплоутилізатор, визначається з рівняння (6); $\bar{t}_{out} = 0.5(t_{out} + t_2)$; $\bar{t}_1 = 0.5(t_1 + t_z)$.

Останні складові в рівняннях (7) і (8) визначають кількість теплоти, виділеної з вологого повітря при конденсації вологи на стінках труб.

Висновки і перспективи.

1. Сформульована математична модель, яка описує нестационарний процес теплообміну в системі створення мікроклімату, може бути використана для обґрунтування конструктивних та режимних параметрів теплоутилізатора незалежно від конструктивних особливостей.

2. Математична модель визначає перехідний процес у системі «приміщення-теплоутилізатор» та може бути використана при створенні системи автоматичного керування температурно-вологісними режимом.

Список використаних джерел

1. Пришляк В. М., Яропуд В. М. Аналіз і класифікація технологічних схем теплоутилізаторів для тваринницьких приміщень. Науково-теоретичний збірник "Вісник ЖНАЕУ. 2014. Вип. 2(45), № 4(2). С. 344–350.

2. Бурдо О. Г. Эволюция сушильных установок: монография. Одесса: Полиграф, 2010. 368 с.
3. Техніка сільськогосподарська. Рекуперативні теплоутилізатори вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Методи випробувань: СОУ 74.3-37-265-2005. К.: Мінагрополітики України, 2005. 37 с.
4. Довбненко О. Ф. Обґрунтування режимів роботи теплоутилізаторів вентиляційних викидів тваринницьких приміщень: автореф. дис... канд. техн. наук. . Глеваха: 2001. 22 С.
5. Яропуд В. М. Обґрунтування конструкційно-режимних параметрів теплоутилізатора для тваринницьких приміщень: автореф. дис... канд. техн. наук. . Вінниця: ВНАУ, 2016. 19 С.
6. Яропуд В. М., Алієв Е. Б. Методика інженерного розрахунку параметрів теплоутилізатора для тваринницьких приміщень. Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 212, № 2. С. 214–221.
7. Герасимчук Ю. В. Математична модель рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Науковий вісник НУБіП України. 2014. Вип. 194, № 2. С. 93–99.
8. Герасимчук Ю. В., Гирченко М. Т., Довбненко О. Ф. Эффективность использования систем управления теплоутилизаторами вентиляционных выбросов животноводческих помещений. Автоматизация сельскохозяйственного производства. Сборник докладов международной научно-технической конференции. 2004. Вип. 4. С. 59–66.
9. Котов Б. І. Визначення параметрів регенеративного утилізатора теплоти з дисковою насадкою. Сільськогосподарські машини: зб. наук. ст. 2001. Вип. 9. С. 93–97.
10. Спирін А. В., Котов Б. І., Труханська О. О. Математична модель регенеративного теплоутилізатора теплових викидів сільськогосподарських. Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення: 2016. С. 92–95.

References

1. Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M. (2014) Analiz i klasyfikatsiia tekhnolohichnykh skhem teploutylizatoriv dlia tvarynnytskykh prymishchen [Analysis and classification of technological schemes of heat recovery equipment for livestock facilities]. Naukovo–teoretychnyi zbirnyk "Visnyk ZhNAEU, 2(45), № 4(2), 344–350.
2. Burdo, O. G. (2010). Evolyutsiya sushil'nykh ustanovok : monografiya [The evolution of dryers: a monograph]. Odessa: Poligraf, 368.
3. Tekhnika silskohospodarska. Rekuperatyvni teploutylizatory ventylyatsiinykh vykydiv tvarynnytskykh prymishchen. Metody vyprobuvan: SOU 74.3-37-265-2005 [Agricultural machinery. Recuperative heat utilizers of ventilation emissions of livestock building. Test methods: SOU 74.3-37-265-2005]. K.: Minahropolityky Ukrainy, 2005. 37.
4. Dovbnenko, O. F. (2001). Obgruntuvannia rezhymiv roboty teploutylizatoriv ventylyatsiinykh vykydiv tvarynnytskykh prymishchen [Substantiation of modes of

operation of heat utilizers of ventilation emissions of livestock building]: avtoref. dys... kand. tekhn. nauk. . Hlevakha, 22.

5. Yaropud, V. M. (2016). Obgruntuvannia konstruktsiinorezhymnykh parametriv teploutylizatora dlia tvarynnytskykh prymishchen [Substantiation of structural parameters of heat utilizer for livestock building]: avtoref. dys... kand. tekhn. nauk. . Vinnytsia: VNAU, 19.

6. Yaropud, V. M., Aliiev, E. B. (2015). Metodyka inzhenernoho rozrakhunku parametriv teploutylizatora dlia tvarynnytskykh prymishchen [Methods of engineering calculation of heat recovery parameters for livestock facilities]. Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex, 212(2), 214–221.

7. Herasymchuk, Yu. V. (2014) Matematychna model rekuperatyvnoho teploutylizatora ventyliatsiinykh vykydiv tvarynnytskykh prymishchen [Mathematical model of recuperative heat utilizer of ventilation emissions of livestock building]. Scientific Bulletin of NULES of Ukraine, 194(2), 93–99.

8. Gerasimchuk, Yu. V., Girchenko, M. T., Dovbnenko, O. F. (2004). Effektivnost' ispol'zovaniya sistem upravleniya teploutylizatorami ventilyatsionnykh vybrosov zhyvotnovodcheskikh pomeshcheniy. Avtomatizatsiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva [Efficiency of use of control systems of heat utilizers of ventilating emissions of livestock building]. Automation of agricultural production. Proceedings of the international scientific and technical conference, 4, 59–66.

9. Kotov, B. I. (2001). Vyznachennia parametriv reheneratyvnoho utylizatora teploty z dyskovoio nasadkoio [Determination of the parameters of the regenerative heat recovery unit with a disk nozzle]. Agricultural machinery: Coll. Science, 9, 93–97.

10. Spirin, A. V., Kotov, B. I., Trukhanska, O. O. (2016). Matematychna model reheneratyvnoho teploutylizatora teplovykh vykydiv silskohospodarskykh [Mathematical model of regenerative heat recovery of agricultural thermal emissions]. Information society: technological, economic and technical aspects of formation, 92–95.

Mathematical model of the dynamic modes of the microclimate system in the livestock building with a heat exchanger

V. Hryshchenko, B. Kotov, Yu. Pantsyr, I. Herasymchuk

Abstract. *The article determines the relevance of research options for the use of heat exchange equipment for the utilization of the heat of the exhaust air of livestock building. It has been analyzed that for the efficient functioning of heat-utilizers, it is necessary not only to choose optimal design parameters, but also to implement rational energy-efficient modes. It was determined that for the synthesis of the system of automatic control of the thermo-humidity mode in the room, it is necessary to determine the dynamic characteristics of the control object based on the mathematical model of dynamic modes. The analysis of the existing heat utilization systems is presented and it is stated that they have only analytical dependencies for their description, which describe the stationary regimes of heat utilization systems that determine the statics of heat and mass exchange (moisture condensation on the surface) processes. In the considered works, the combined functioning of the heat recovery unit and the livestock building in non-stationary mode is*

not considered. On the basis of the analysis of the heat-moisture regime of the livestock building, the ventilation system of which is equipped with a recuperative type heat recovery unit, a mathematical description in the form of differential equations of the heat and material balance of the livestock building with the heat utilization ventilation system was compiled. Mathematical models of the heat and material balance for the livestock building have been developed in the form of a system of three differential equations, which contain two interrelated parameters: temperature and air humidity. But since the parameters of the air in the room with the waste ventilation air heat utilizer depend on the parameters and mode of operation of the heat exchanger, the equation of the thermal regime of the room was developed with the equations that determine the non-stationary thermal regime of the heat utilizer. The formulated mathematical model describes the non-stationary process of heat exchange in the microclimate creation system and can be used to justify the design and operating parameters of the heat exchanger regardless of design features. The mathematical model defines the transition process in the "room-heat-utilizer" system and can be used to create a system for automatic temperature-humidity control.

Key words: *livestock building, microclimate, heat exchanger, thermal regime, mathematical model*