

УДК 697.95

Аналітичне дослідження ефективності роботи природної загальнообмінної вентиляції в приміщеннях для утримання великої рогатої худоби

Б. М. Федяй¹, Д. В. Гузик², О. В. Макаренко³

¹ к.т.н., доцент, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна, fed_bn@ukr.net

² к.т.н., доцент, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна, guzikd64@ukr.net

³ к.т.н., доцент, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна, saha.makar.g@gmail.com

Анотація. В енергетичному балансі приміщень для утримання великої рогатої худоби експлуатаційні витрати на роботу загальнообмінної системи вентиляції становлять близько 30 %. У статті проаналізовано можливість підвищення енергоефективності системи загальнообмінної вентиляції приміщення для утримання великої рогатої худоби за рахунок переходу з механічної на природну вентиляцію в окремі періоди року. Аналіз базується на сумісному вирішенні рівнянь теплового та повітряного балансу приміщення корівника та аналітичному дослідженні зміни продуктивності системи природної вентиляції при зміні температури зовнішнього повітря в різні періоди року. Комбінація механічної та природної вентиляції суттєво скорочує річне споживання електричної енергії двигунами вентиляційних агрегатів загальнообмінної примусової вентиляції. Поза опалювальним періодом роботу природної вентиляції необхідно дублювати системами примусової вентиляції.

Ключові слова: механічна вентиляція, природна вентиляція, енергоефективність, велика рогата худоба

Вступ. Індустріальне тваринництво є однією з галузей економіки країн ЄС та України, яка характеризується динамічним розвитком. Відомо, що вихід кінцевої продукції підприємств вирощування великої рогатої худоби залежить від параметрів мікроклімату всередині приміщення для її утримання [1-6]. Зазначені параметри формуються інженерними системами опалення, вентиляції і кондиціонування повітря та об'ємно-планувальним рішенням будівлі.

Актуальність дослідження. Одним із способів підвищення енергетичної ефективності систем вирощування великої рогатої худоби є переведення в окремі періоди року приміщень для її утримання з режиму примусової загальнообмінної вентиляції на природну та економія електричної енергії. Визначення діапазону температури зовнішнього повітря, у межах якого можливе ефективне застосування протягом року природної загальнообмінної вентиляції без залучення механічної вентиляції, є актуальною задачею підвищення енергоефективності в приміщеннях для утримання великої рогатої худоби.

Останні дослідження та публікації. Системи загальнообмінної механічної вентиляції є досить поширеним способом боротьби з надлишковою вологою, надлишковими тепловиділеннями та шкідливостями, який забезпечує потрібну якість повітря в приміщенні для утримання великої рогатої худоби [2, 7, 8].

Відомо, що в таких системах зовнішнє повітря після попередньої підготовки в припливній камері подається до внутрішнього об'єму приміщення для утримання великої рогатої худоби системою вентиляторів. При цьому видалення повітря відбувається за рахунок створюваного припливними вентиляторами надлишкового тиску через центральний витяжний отвір у даховому перекритті корівника (рис. 1). Недоліком даної системи є наявність витрат електричної енергії на приводи електродвигунів припливних або витяжних вентиляторів.

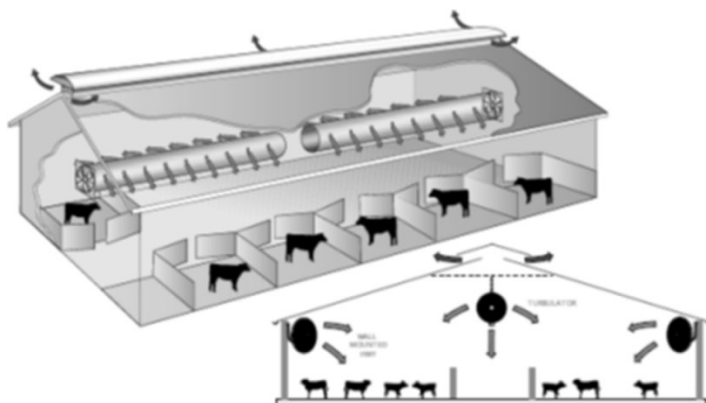


Рис. 1. Приклад механічної системи вентиляції приміщення для утримання великої рогатої худоби (адаптовано з [7])

Для забезпечення потрібної якості повітря в приміщеннях для утримання великої рогатої худоби також застосовують системи природної (гравітаційної) вентиляції. При цьому припливне повітря надходить крізь припливні щілинні отвори, улаштовані в бічних зовнішніх огорожувальних конструкціях корівника [4, 9, 10, 11]. Видалення повітря здійснюється крізь центральний витяжний отвір у даховому перекритті корівника (рис. 2).

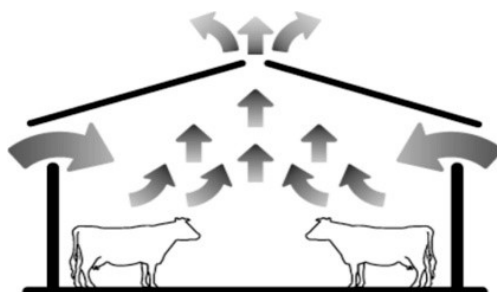
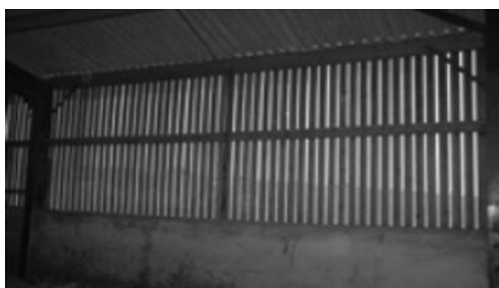


Рис. 2. Приклад механічної системи вентиляції приміщення для утримання великої рогатої худоби (адаптовано з [9])

Характерним недоліком даної системи загальнообмінної вентиляції є те, що її продуктивність суттєво залежить від температури внутрішнього повітря та зовнішніх кліматичних умов, зокрема, температури зовнішнього повітря.

Формулювання цілей статті. Метою досліджень є розрахунок продуктивності системи загальнообмінної природної вентиляції приміщення для утримання великої рогатої худоби при змінній температурі зовнішнього повітря та визначення діапазону середньомісячної температури зовнішнього повітря, у межах якого можливе забезпечення розрахункового повітрообміну зазначеною системою.

Основна частина. Як предмет досліджень виступає корівник на 50 голів, розташований у м. Полтаві. Середня маса однієї тварини прийнята 500 кг. Параметри мікроклімату: температура внутрішнього повітря (для холодного періоду року) становить 8 °С; для перехідного 15 °С, для теплого 20,5 °С, відносна вологість повітря 75 %. Інтенсивність надходження CO₂ від худоби до внутрішнього об'єму приміщення 110 л/год. Гранічно допустима концентрація CO₂ у внутрішньому об'ємі приміщення корівника становить 2,5 л/м³. Концентрація CO₂ в зовнішньому повітрі становить 0,4 л/м³. Розрахункова температура зовнішнього повітря для системи опалення мінус 23 °С. Об'єм приміщення корівника становить 10000 м³. Спосіб утримання тварин – прив'язний. Відповідно до зазначених вище вихідних умов виконано попередній розрахунок повітрообміну для боротьби з основними шкідливостями по окремим місяцям року в приміщенні корівника. Результати розрахунку наведені в табл. та на рис. 3.

Таблиця

Розрахунковий повітрообмін для боротьби з основними шкідливостями в приміщенні корівника

Місяць	$t_{зов},$ °С	$\rho_{зов},$ кг/м ³	$L_{CO_2},$ м ³ /год	$L_W,$ м ³ /год	$L_Q,$ м ³ /год	$\rho_{вн},$ кг/м ³	$\Phi,$ %	$d_{вн},$ г/кг	$d_{зов},$ г/кг
Січень	-5,6	1,320	2452	4690,83	15254	1,25	85	5,7	2,2
Лютий	-4,7	1,316	2462	4831,39	15254	1,25	82	5,7	2,3
Березень	0,3	1,292	2459	3168,00	3537	1,22	78	8,3	3
Квітень	9	1,252	2552	4810,03	4081	1,22	66	8,3	4,8
Травень	15,4	1,224	2621	12708,60	24117,6	1,22	61	8,3	7
Червень	18,7	1,210	2552	2436,62	6945	1,18	65	15,5	8,4
Липень	20,5	1,203	2570	2990,53	9445	1,18	66	15,5	9,7
Серпень	19,7	1,206	2562	2751,99	7688	1,18	64	15,5	9,2
Вересень	14,3	1,229	2609	13000,66	22107,8	1,22	69	8,3	7
Жовтень	7,7	1,258	2538	5161,63	3401,2	1,22	77	8,3	5
Листопад	1,3	1,287	2470	3604,72	3537,25	1,22	86	8,3	3,6
Грудень	-3,4	1,309	2476	5722,87	15254,7	1,25	87	5,7	2,8

У випадку природної загальнообмінної вентиляції рушійною силою повітряних мас у приміщенні корівника буде гравітаційний тиск, значення якого визначається за відомим рівнянням [12, 13]

$$P_{gp} = g H (\rho_{зов} - \rho_{вн}), \text{ Па}, \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²; H – різниця позначок висот між рівнем вхідного та вихідного отворів, м; $\rho_{зов}$ – густина зовнішнього повітря, кг/м³; $\rho_{вн}$ – густина внутрішнього повітря, кг/м³.

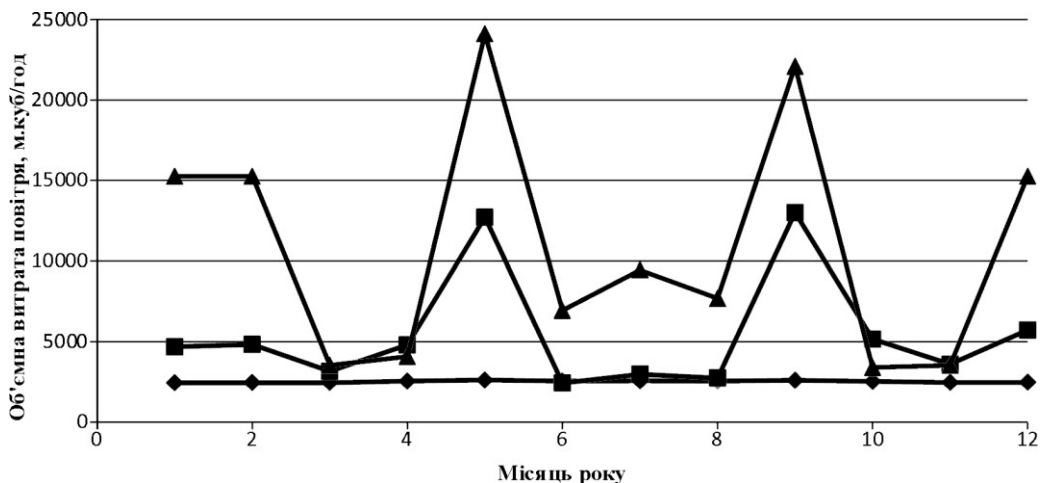


Рис. 3. Зміна повітрообміну по боротьбі з основними шкідливостями в приміщенні корівника по різним місяцям року:

- ◆ – повітрообмін для боротьби зі шкідливими газами, м³/год;
- – повітрообмін для боротьби з надлишковими вологовиділеннями, м³/год;
- ▲ – повітрообмін для боротьби з надлишковими тепловиділеннями, м³/год

При природній вентиляції розрахунковий гравітаційний тиск, визначений за формулою (1), витрачається на подолання місцевих опорів вхідного та вихідного вентиляційного отворів у процесі переміщення повітряних мас в об'ємі приміщення корівника. Тобто можна записати

$$P_{zp} = \Delta P_{вих} + \Delta P_{ex}, \text{ Па}, \quad (2)$$

де $\Delta P_{вих}$ – місцеві втрати тиску у вихідному вентиляційному отворі корівника, Па, які визначають за відомою формулою

$$\Delta P_{вих} = \xi_{вих} \rho \omega_{вих}^2 / 2, \text{ Па}, \quad (3)$$

де $\xi_{вих}$ – коефіцієнт місцевого опору вихідного вентиляційного отвору; $\omega_{вих}$ – швидкість повітря в цьому отворі, м/с.

Місцеві втрати тиску у вхідному вентиляційному отворі корівника визначають аналогічно:

$$\Delta P_{ex} = \xi_{ex} \rho \omega_{ex}^2 / 2, \text{ Па}, \quad (4)$$

де ξ_{ex} – коефіцієнт місцевого опору вхідного вентиляційного отвору; ω_{ex} – швидкість повітря в цьому отворі, м/с.

Тоді з урахуванням рівнянь (3) та (4) рівняння (2) набуде вигляду:

$$P_{zp} = \xi_{вих} \frac{\rho \omega_{вих}^2}{2} + \xi_{ex} \frac{\rho \omega_{ex}^2}{2}, \text{ Па}. \quad (5)$$

З урахуванням рівняння нерозривності потоку формула (5) набуде вигляду

$$P_{zp} = \xi_{вих} \frac{\rho}{2} \left(\frac{L}{3600 f_1} \right)^2 + \xi_{вх} \frac{\rho}{2} \left(\frac{L}{3600 f_2} \right)^2, \text{ Па}, \quad (6)$$

де f_1 та f_2 – відповідно, площа вихідного та вхідного вентиляційних отворів, м^2 ; L – об’ємна витрата вентиляційного повітря, що циркулює через приміщення корівника під дією гравітаційного тиску, $\text{м}^3/\text{год}$. З рівняння (6)

$$L = \sqrt{\frac{2P_{zp}/\rho}{\xi_{вих} \left(\frac{1}{3600 f_1} \right)^2 + \xi_{вх} \left(\frac{1}{3600 f_2} \right)^2}}, \text{ м}^3/\text{год}. \quad (7)$$

Як видно з рівнянь (1) та (7), основними параметрами, що визначають продуктивність природної загальнообмінної вентиляції, є температура зовнішнього та внутрішнього повітря. Остання визначається тепловим та повітряним режимом приміщення. Відповідно до прийнятої схеми теплових потоків (рис. 4), тепловий режим приміщення неопалюваного корівника в першому наближенні можна характеризувати рівнянням [14]

$$Q_{c.p.} + c G t_{вх} + Q_{явне} + Q_{осв} = Q_{o.к.} + Q_{випар} + c G t_{вих}, \text{ Вт}, \quad (8)$$

де $Q_{c.p.}$ – теплонадходження від сонячної радіації, Вт; $c G t_{нов}$ – теплонадходження з припливним повітрям, Вт; c – теплоємність повітря, Дж/(кг К); G – масова витрата повітря у припливних та витяжних отворах, кг/с; $t_{вх}$ – температура припливного повітря, $^{\circ}\text{C}$; $Q_{явне}$ – потік явної теплоти, що виділяється тваринами, Вт; $Q_{осв}$ – потік теплоти, що надходить від освітлювальних та інших електричних приладів у приміщенні корівника, Вт; $Q_{o.к.}$ – тепловтрати крізь огорожувальні конструкції приміщення, Вт; $Q_{випар}$ – втрати явної теплоти, що перетворюється на приховану при випаровуванні вологи з відкритих і змочених поверхонь у приміщенні корівника, Вт; $c G t_{вих}$ – тепловтрати з повітрям, що видаляється з приміщення корівника, Вт; $t_{вих}$ – температура витяжного повітря, $^{\circ}\text{C}$.

За результатами сумісного розв’язання рівнянь (1), (7), (8) у програмному комплексі комп’ютерної алгебри MathCad одержано результати, які наведені на рис. 5-7.

З результатів, наведених на рис. 6, можна зробити висновок, що в окремі місяці року експлуатація будівлі в режимі відсутності опалення та діючої загальнообмінної природної вентиляції є недопустимою, оскільки температура на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій нижча за температуру точки роси. Як відомо, це призводитиме до погіршення теплозахисних властивостей зазначених конструкцій та утворення плісняви.

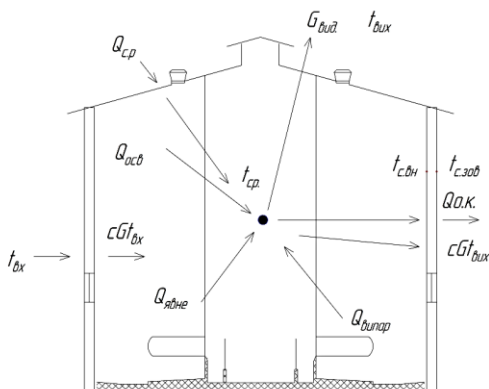


Рисунок 4. Схема теплових потоків в приміщенні для утримання великої рогатої худоби

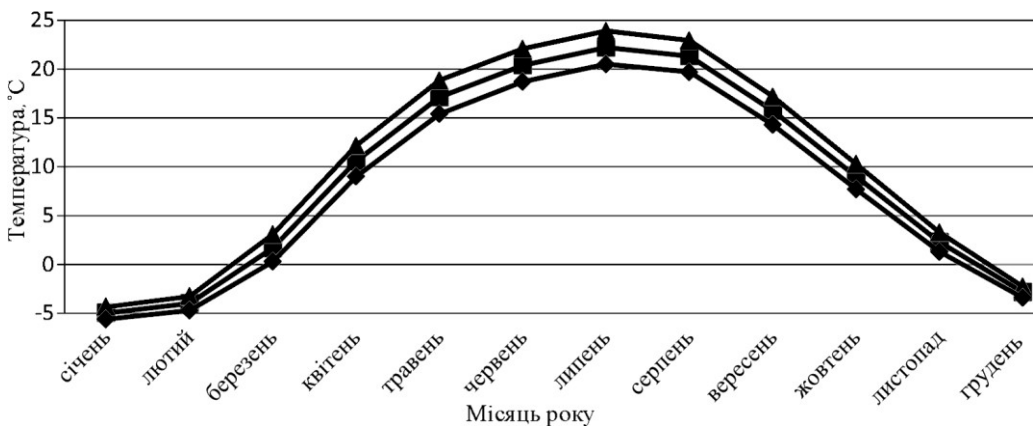


Рис. 5. Зміна температури повітря на вході, виході та всередині приміщення неопалюваного корівника за окремими місяцями року при природній вентиляції:

■ — середня температура повітря в приміщенні корівника; ▲ — температура повітря на виході з приміщення корівника; ◆ — температура повітря на вході до приміщення корівника

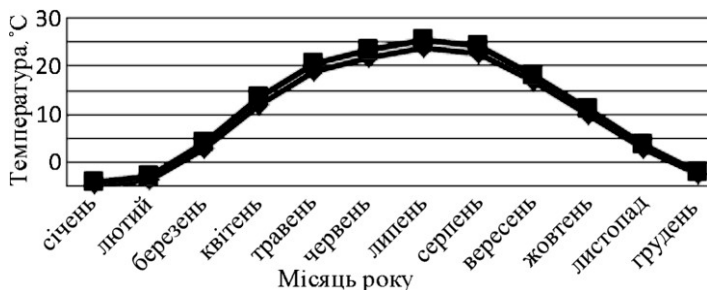


Рисунок 6. Зміна середніх температур на внутрішній та зовнішній поверхнях огорожувальних конструкцій приміщення неопалюваного корівника по окремим місяцям року при природній вентиляції:

◆ — середня температура на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій корівника; ■ — середня температура на зовнішній поверхні огорожувальних конструкцій корівника

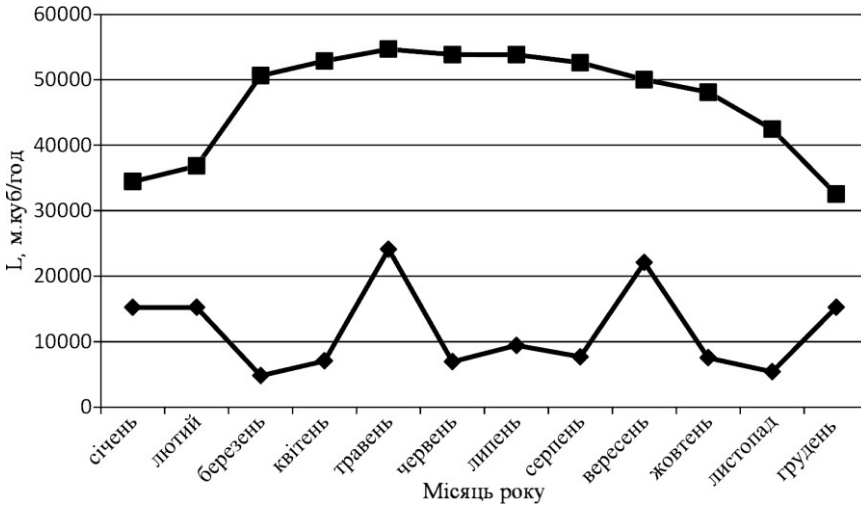


Рисунок 7. Зміна розрахункового повітрообміну (механічна вентиляція) та продуктивності гравітаційної вентиляції по окремим місяцям року:

◆ – розрахунковий повітрообмін, м³/год;
 ■ – повітрообмін за рахунок природного розрідження, м³/год

Для унеможливлення утворення конденсату на внутрішніх поверхнях огорожувальних конструкцій необхідно підтримувати потрібний температурний режим приміщення корівника за допомогою системи опалення.

Тепловий режим приміщення опалюваного корівника можна характеризувати рівнянням

$$Q_{c.p.} + c G t_{вх} + Q_{явне} + Q_{осв} + Q_{c.o.} = Q_{o.k.} + Q_{витар} + c G t_{вих}, \text{ Вт}, \quad (9)$$

де $Q_{c.o.}$ – теплонадходження від системи опалення, Вт.

Результати розв'язання рівняння (9) з урахуванням рівнянь (1) і (7) у програмному комплексі комп'ютерної алгебри MathCad приведені на рис. 8-10.

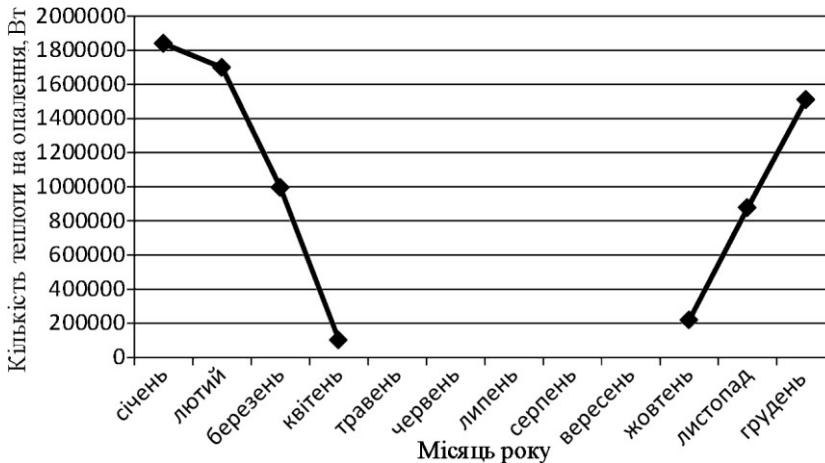


Рисунок 8. Витрата теплової енергії на опалення корівника по окремим місяцям року

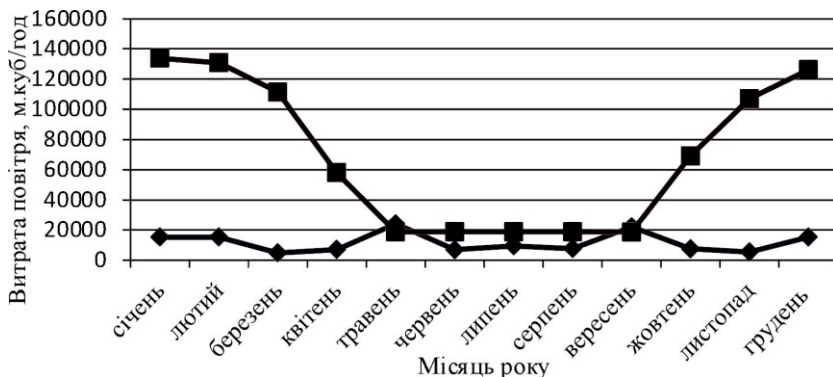


Рисунок 9. Порівняння розрахункового повітрообміну та повітрообміну за рахунок природної вентиляції по окремим місяцям року в приміщенні опалюваного корівника:

◆ — розрахунковий повітрообмін, м³/год;
 ■ — повітрообмін за рахунок природної вентиляції, м³/год

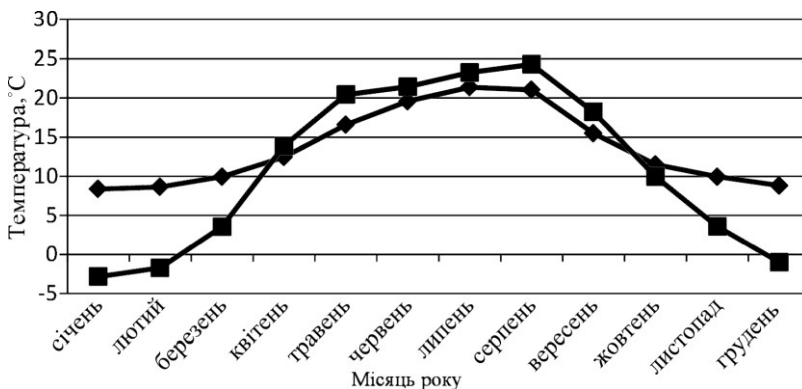


Рис. 10. Зміна середніх температур на внутрішній та зовнішній поверхнях огорожувальних конструкцій приміщення опалюваного корівника по окремим місяцям року при природній вентиляції:

◆ — середня температура на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій корівника;
 ■ — середня температура на зовнішній поверхні огорожувальних конструкцій корівника

Висновки. Наведені результати аналітичних розрахунків свідчать про можливість ефективного використання в корівнику розглянутої конструкції в опалювальний період природної загальнообмінної вентиляції без залучення механічної вентиляції. Таке рішення дає можливість суттєвого скорочення річного споживання електричної енергії електричними приводами вентиляційних агрегатів системи загальнообмінної примусової вентиляції. У той же час, поза опалювальним періодом роботу природної вентиляції необхідно дублювати системами примусової вентиляції.

Література

1. Fediai B. Calculation of air exchange to reduce CO₂ by periodic ventilation of cattle buildings / B. Fediai, D. Guzyk // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб. / Київський національний університет будівництва і архітектури*. – 2016. – Вип. 20. – с. 54-61.
2. Строй А. Ф. Теплоснабжение и вентиляция сельскохозяйственных зданий и сооружений / А. Ф. Строй. – Киев: Вища школа, 1983. – 215с.
3. Marucci A. The heat stress for workers employed in a dairy farm / A. Marucci, D. Monaco, M. Cecchini, A. Colantoni, D.E. Giacinto, A. Cappuccini // *Agricultural Engineering*. – 2013. – № XLIV.
4. Sharp G.M. Ventilation of cattle and sheep buildings. Technical Note / G.M. Sharp. – SAC, 2008.
5. Armstrong D.V. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling / *J. Dairy Sci.* 77:2044–2050.
6. Федяй Б. М. Повітрообмін в тваринницьких приміщеннях з гумовим підлого-вим покриттям / Б. М. Федяй // *Енергетика та автоматика*. – 2014. – №4. – с. 109-118.
7. Dairy and beef ventilation. Technical report [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.hydor.co.uk/ebookchures/dairy_ventilation.pdf.
8. Егизаров А. Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственного комплекса / А. Г. Егизаров. – Москва. – Стройиздат, 1981. – 239 с.
9. Robertson J. Better Cattle Housing Design / J. Robertson. – BRP, 2013.
10. Gooch C. Dairy Freestall Barn Design – A Northeast Perspective / C. Gooch, Ninth Annual Fall Dairy Conference, 2008.
11. Flaba J. Design Recommendations of Beef Cattle Housing / J. Flaba, CIGR, 2004.
12. Староверов И. Г. Внутренние санитарно-технические устройства. Часть II. Вентиляция и кондиционирование воздуха / И.Г. Староверов. – Москва. – Стройиздат, 1977.
13. Щекин Р. В. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Книга 2-ая. Вентиляция и кондиционирование воздуха / Р.В. Щекин. – Київ. – Будівельник, 1976.
14. Федяй Б. М. Моделювання теплового режиму будівель при кооперованому утриманні тварин / Б. М. Федяй, О. Д. Гузик, Д. В. Гузик // *Науковий вісник будівництва: зб. наук. пр. / Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури*. – 2012. – Вип. 70. – с. 389-395.

References

1. Fediai B., Guzyk D. “Calculation of air exchange to reduce CO₂ by periodic ventilation of cattle buildings.” *Ventyliatsiia, osviltennia ta teplohazopostachannia: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, Iss. 20, Kyiv National University of Construction and Architecture, 2016, pp. 54-61.
2. Stroi A. F. *Teplosnabzhenye y ventyliatsiia selskokhoziaistvennykh zdanyi y sooruzhenyi*. Vyshcha shkola, 1983.
3. A. Marucci, D. Monaco, M. Cecchini, A. Colantoni, D.E. Giacinto, A. Cappuccini. “The heat stress for workers employed in a dairy farm.” *Agricultural Engineering*, no. XLIV, 2013.
4. Sharp G.M. *Ventilation of cattle and sheep buildings. Technical Note*, SAC, 2008.
5. Armstrong D.V. 1994. Heat stress interaction with shade and cooling / *J. Dairy Sci.* 77:2044–2050.

6. Fediai B. M. "Povitroobmin v tvarynnytskykh prymishchenniakh z humovym pidlohovym pokryttiam." *Enerhetyka ta avtomatyka*, no. 4, 2014, pp. 109-118.
7. Dairy and beef ventilation. Technical report, http://www.hydor.co.uk/ebrochures/dairy_ventilation.pdf.
8. Egizarov A. G. *Otoplenye i ventilyatsiya zdaniy i sooruzheniy selskokhoziaistvennogo kompleksa*. Stroiizdat, 1981.
9. Robertson J. *Better Cattle Housing Design*, BRP, 2013.
10. Gooch C. *Dairy Freestall BarnDesign – A Northeast Perspective*, Ninth Annual Fall Dairy Conference, 2008.
11. Flaba J. *Design Recommendations of Beef Cattle Housing*, CIGR, 2004.
12. Staroverov I. G. *Vnutrennie sanytarно-tekhnicheskie ustroystva. Chast II. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha*, Stroiizdat, 1977.
13. Shechekin R. V. *Spravochnik po teplosnabzheniyu i ventilyatsii. Kniga 2-aya. Ventilyatsiya i konditsionirovanie vozdukha*, Budivelnik, 1976.
14. Fediai B.M., Huzyk O.D., Huzyk D.V. "Modeliuvannya teplovoho rezhymu budivel pry kooperovanomu utrymanni tvaryn." *Naukovyi visnyk budivnytstva: zbirnyk naukovykh prats*, Iss. 70, Kharkivskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury, 2012, pp. 389-395.

УДК 697.95

Аналитическое исследование эффективности работы естественной общеобменной вентиляции в помещениях для содержания крупного рогатого скота

Б. Н. Федяй¹, Д. В. Гузик², А. В. Макаренко³

¹ к.т.н., доцент, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, fed_bn@ukr.net

² к.т.н., доцент, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, guzikd64@ukr.net

³ к.т.н., доцент, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина, saha.makar.g@gmail.com

Аннотация. В энергетическом балансе помещений для содержания крупного рогатого скота эксплуатационные затраты на работу общеобменной вентиляции составляют около 30%. В статье проанализирована возможность повышения эффективности систем общеобменной вентиляции помещения для содержания крупного рогатого скота за счет перехода с механической на естественную вентиляцию в отдельные периоды года. Анализ основан на совместном решении уравнений теплового и воздушного балансов помещения коровника и аналитическом исследовании изменения производительности системы естественной вентиляции при изменении температуры наружного воздуха в разные периоды года. Комбинация механической и естественной вентиляции существенно сокращает годовое потребление электрической энергии двигателями вентиляционных агрегатов общеобменной принудительной вентиляции. Вне отопительного периода работу естественной вентиляции необходимо дублировать системами принудительной вентиляции.

Ключевые слова: механическая вентиляция, естественная вентиляция, энергоэффективность, крупный рогатый скот

UDC 697.95

An Analytical Study of the Efficiency of the Natural General Ventilation of Cattle Building

B. M. Fediai¹, D. V. Guzyk², O. V. Makarenko³

¹PhD, docent, Poltava National Technical Yuri Kondratiuk University, Poltava, Ukraine, fed_bn@ukr.net

²PhD, docent, Poltava National Technical Yuri Kondratiuk University, Poltava, Ukraine, guzikd64@ukr.net

³PhD, docent, Poltava National Technical Yuri Kondratiuk University, Poltava, Ukraine, saha.makar.g@gmail.com

Abstract. Operating costs for the work of general ventilation systems is about 30 % in the energy balance of premises for keeping cattle. The possibility of increasing the efficiency of general ventilation of the premises for keeping cattle due to the transition from mechanical to natural ventilation in certain period of the year is analysed in the article. The analysis is based on a compatible solution of equations of heat and air balance in cowshed and analytical productivity of changes of natural ventilation when the outdoor temperature of air is different in each season. The combination of mechanical and natural ventilation significantly reduces the annual consumption of electric energy by the engines of ventilation units of general forced ventilation. Outside the heating period, the operation of natural ventilation must be duplicated by forced ventilation systems.

Key words: mechanical ventilation, natural ventilation, energy efficiency, cattle.

Надійшла до редакції 21 квітня 2017 р.