

DOI <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-1-6>

УДК 631.3:620.9

О. С. Ковязін¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3027-872X

І. О. Чижигов¹, канд. техн. наук

ORCID: 0000-0002-3022-4828

С. В. Дереза¹

ORCID: 0000-0001-9797-0967

А. С. Пастушенко², канд. техн. наук

ORCID: 0000-0003-2540-3677

¹Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного²Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

АНАЛІЗ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ТЕРМОРЕГУЛЯЦІЇ ПОВІТРЯ У ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Анотація. У статті проаналізовано альтернативні джерела енергії, що можуть використовуватися для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях. Розглянуто ефективність сонячної та вітрової енергетики, біомаси, біогазових технологій, теплових насосів і систем рекуперації тепла. Оцінено їхній вплив на енергоефективність тваринницьких господарств, потенціал зниження витрат на енергоресурси й екологічні переваги. Визначено основні переваги й обмеження застосування кожного виду енергії, враховуючи їхню доступність та можливість інтеграції в сучасні аграрні технології. Встановлено, що геотермальні системи є одним із найбільш стабільних та перспективних рішень для терморегуляції, оскільки не залежать від сезонних змін і забезпечують високу енергоефективність у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: мікроклімат, сонячна енергія, вітроенергетика, біоенергетика, геотермальні системи, біогаз, рекуперація тепла, енергоефективність, сталий розвиток.

Постановка проблеми. Сучасне тваринництво характеризується високими енергетичними витратами на підтримання мікроклімату у виробничих приміщеннях. Традиційні джерела енергії, зокрема газ, вугілля та дизельне паливо, є економічно затратними й екологічно небезпечними. Водночас застосування альтернативних енергетичних технологій, як-от сонячна, вітрова, біоенергетика та геотермальні системи, має потенціал зниження витрат і зменшення негативного впливу на довкілля.

Однак вибір оптимальної енергетичної стратегії для тваринницьких господарств ускладнюється недостатнім науковим обґрунтуванням ефективності альтернативних джерел енергії в умовах конкретних виробничих процесів. Потрібне проведення комплексного аналізу їхньої техніко-економічної доцільності для забезпечення сталого розвитку галузі.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження підтверджують ефективність альтернативних джерел енергії у тваринництві. Зокрема, використання сонячних колекторів для обігріву приміщень дає можливість знизити споживання традиційних енергоносіїв, особливо в регіонах із високою інсоляцією [1]. Вітроенергетичні системи демонструють потенціал для забезпечення електроживлення вентиляційних і опалювальних установок, проте їх ефективність залежить від швидкості та стабільності вітрових потоків [2]. Біогазові установки на основі органічних відходів є перспективним рішенням для автономного енергозабезпечення, оскільки дають змогу отримувати теплову й електричну енергію, одночасно зменшуючи екологічний вплив [3]. Також досліджуються теплові насоси та рекупераційні системи, що оптимізують мікроклімат у тваринницьких комплексах і підвищують енергоефективність виробництва [4].

Попри значний прогрес у галузі, потрібні подальші дослідження щодо адаптації цих технологій до конкретних кліматичних і виробничих умов, а також оцінки їхньої економічної доцільності в довгостроковій перспективі.

Формулювання мети статті. Метою дослідження є аналіз альтернативних джерел енергії для терморегуляції тваринницьких приміщень та оцінка їхнього впливу на енергоефективність господарств.

Основна частина. Розглянемо найбільш поширені **альтернативні джерела енергії**, що можуть забезпечувати (повністю або частково) терморегуляцію повітря у тваринницьких приміщеннях, з урахуванням їхньої ефективності, економічної доцільності й екологічного впливу.

Сонячна енергія. В Україні середній рівень сонячної радіації становить 1000-1400 кВт·год/м² на рік [1], що створює сприятливі умови для застосування сонячних енергетичних технологій. Такий рівень енергонадходження дає змогу ефективно впроваджувати фотоелектричні та теплові сонячні установки для часткового або повного енергозабезпечення тваринницьких господарств, зокрема у південних і центральних регіонах, де інсоляція є найвищою.

Сонячна енергетика базується на перетворенні сонячного випромінювання в теплову або електричну енергію [5]. Для безпосереднього підігріву повітря у тваринницьких приміщеннях переважно застосовуються **сонячні колектори** [6].

Фотоелектричні модулі (**сонячні панелі**) перетворюють сонячне випромінювання на електричну енергію, яка може використовуватися для живлення систем вентиляції, теплових насосів, обігрівальних елементів тощо [7].

У південних регіонах із високим рівнем сонячної інсоляції протягом року використання сонячних колекторів дає змогу суттєво знизити споживання традиційних енергоносіїв. Однак повне забезпечення річної потреби в тепловій енергії лише за сонячного випромінювання є технічно складним завданням. Тому сонячна енергія переважно використовується як додаткове джерело, що дає можливість зменшити навантаження на основні системи опалення й підвищити енергоефективність господарства.

Енергія вітру. Загальний потенціал вітроенергетики в Україні з урахуванням рельєфу місцевості, доступних територій та сучасних технологій оцінюється приблизно у 30-40 ТВт·год на рік [2]. Найсприятливішими регіонами для розвитку вітроенергетичних потужностей є території з високою середньою швидкістю вітру. Зокрема, Запорізька область демонструє швидкість вітру вище за середню – 4–6 м/с [1], що робить її одним із перспективних регіонів для розміщення вітрових електростанцій.

Вітроенергетика ґрунтується на перетворенні кінетичної енергії повітряного потоку в механічну або електричну енергію. **Вітрові турбіни** класифікуються за типом осі обертання на горизонтально- та вертикально-осьові, а також відрізняються за потужністю й конструктивними особливостями.

У тваринництві енергія вітру здебільшого використовується опосередковано – вироблена електроенергія спрямовується на живлення теплових насосів, електричних котлів, інфрачервоних обігрівачів, систем керування мікрокліматом та автоматизованої вентиляції.

У більшості випадків вітроенергетика виступає додатковим джерелом енергії, яке сприяє зниженню витрат фермерських господарств на електроенергію, проте не може забезпечувати повну автономність систем опалення чи вентиляції. Найбільш ефективним підходом є її використання в комплексних гібридних системах, які містять накопичувачі енергії та/або інші генератори (наприклад, сонячні панелі або традиційні джерела енергії), що дає змогу компенсувати коливання вітрового потенціалу та забезпечувати стабільне енергозабезпечення.

Енергія біомаси. Біомаса є одним із найбільш перспективних джерел відновлюваної енергії в Україні. Завдяки розвиненому аграрному сектору та значному обсягу біологічних відходів країна має вагомий потенціал для виробництва теплової та електричної енергії, а також біопалива.

За різними оцінками, річний технічний потенціал біомаси в Україні становить близько 20-30 млн т умовного палива [1], що еквівалентно приблизно 20 % загального енергоспоживання країни. Це відкриває широкі можливості для використання біомаси в енергозабезпеченні тваринницьких комплексів, зокрема для опалення приміщень, генерації електроенергії та виробництва біогазу.

Основним способом використання біомаси є її **спалювання** в твердопаливних котлах [8]. Сучасні котли оснащені автоматизованими подавачами палива, системами регулювання температури та контролю рівня кисню в топці, що забезпечує високу ефективність процесу та мінімізує шкідливі викиди. Крім обігріву приміщень, отримане тепло може використовуватися для нагрівання води в системах водяного опалення.

Альтернативним методом є піролізне спалювання (**газифікація**), під час якого біомаса розкладається з утворенням горючих газів, які потім допалюються для отримання тепла [9]. Це технологічне рішення дає змогу підвищити коефіцієнт корисної дії та забезпечує кращий контроль за викидами.

Ще одним ефективним підходом є **біогазові технології**, що базуються на анаеробному бродінні органічних відходів з утворенням біогазу – суміші метану (CH_4) та вуглекислого газу (CO_2) [3]. Біогаз може використовуватися в котельнях, де його спалюють для отримання теплової енергії, або в когенераційних (тригенераційних) системах, де він застосовується у двигунах внутрішнього згоряння для виробництва електроенергії, а тепло двигуна використовується для обігріву.

Упровадження біогазових технологій формує замкнутий енергетичний цикл, у якому тваринницьке господарство використовує власні відходи для генерації енергії та отримує додатковий побічний продукт – органічне добриво (дигестат) [10], що утворюється в процесі бродіння.

Попри певні труднощі, біоенергетичні технології набувають дедалі більшої популярності серед фермерських господарств. Їх застосування сприяє зниженню витрат на енергоносії, зменшенню залежності від традиційних паливних ресурсів та покращенню екологічної ситуації завдяки скороченню викидів парникових газів і раціональному використанню відходів.

Теплова енергія навколишнього середовища. Технології, що ґрунтуються на використанні низькопотенційної теплової енергії навколишнього середовища (повітря, води чи ґрунту), забезпечують її відбір, акумулювання й подальше використання для опалення, кондиціонування повітря та гарячого водопостачання у тваринницьких приміщеннях.

Теплова енергія повітря. Теплова енергія повітря є одним із джерел низькопотенційного тепла, яке можна ефективно використовувати у тваринницьких приміщеннях. Завдяки сучасним технологіям відбору та акумулювання тепла повітряне середовище може слугувати для підтримання оптимального мікроклімату, зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності опалювальних систем.

Повітряні рекуператори (теплообмінники для утилізації тепла витяжного повітря) використовуються для зменшення теплових втрат у тваринницьких приміщеннях шляхом передачі тепла від витяжного повітря до припливного [11]. Це сприяє підвищенню енергоефективності вентиляційних систем, що особливо важливо в умовах значного повітрообміну, необхідного для забезпечення належного мікроклімату в приміщеннях для утримання тварин. Використання рекуператорів дає можливість стабілізувати температурний режим, зменшити витрати на додатковий підігрів повітря та мінімізувати утворення конденсату, що позитивно впливає на санітарно-гігієнічні умови утримання худоби.

Тепловий насос повітря – вода використовує тепло зовнішнього повітря для нагріву теплоносія, що подається у водяну систему опалення чи гарячого водопостачання тваринницьких приміщень [4]. Такі системи особливо ефективні в регіонах із відносно м'яким кліматом, де температура зовнішнього повітря не опускається до критично низьких значень. Застосування теплових насосів повітря – вода дає змогу суттєво зменшити витрати на традиційні енергоносії та підвищити автономність енергозабезпечення господарства.



Тепловий насос повітря – повітря функціонує за принципом реверсивного кондиціонера, забезпечуючи як нагрівання, так і охолодження повітря [12]. У холодний період система працює на обігрів приміщень, а в теплий – на охолодження, що є особливо актуальним для приміщень із нестабільним тепловим балансом, як-от пташники, свинарники та корівники. Завдяки високій швидкості регулювання температури цей тип теплового насоса дає можливість оперативно підтримувати комфортні умови для тварин.

Таким чином, використання теплової енергії повітря у тваринницьких приміщеннях є ефективним заходом для зниження енерговитрат та оптимізації мікроклімату. Однак його впровадження потребує детального техніко-економічного обґрунтування, зокрема оцінки ефективності в конкретних кліматичних умовах, а також врахування особливостей експлуатації та інтеграції в існуючі інженерні системи господарства.

Теплова енергія води. Вода є ефективним носієм теплової енергії, що дає змогу використовувати її для обігріву та підтримання мікроклімату в тваринницьких приміщеннях. Завдяки високій теплоємності вода може акумулювати й передавати значну кількість тепла, що робить її перспективним джерелом низькопотенційної енергії для систем опалення та кондиціювання.

Теплова **енергія стічних вод** може бути ефективно використана для підтримання теплового балансу в тваринницьких приміщеннях [13]. Відбір тепла здійснюється в каналізаційних колекторах або через спеціальні теплообмінники безпосередньо перед скиданням нагрітої води. Це дає змогу мінімізувати втрати енергії, яка в іншому випадку була б безповоротно втрачена, і знизити витрати на опалення та підігрів води. Застосування таких систем є особливо доцільним у господарствах із високим водоспоживанням, наприклад на молочних фермах і в комплексах із вирощування свиней, де велика кількість теплої води використовується для санітарної обробки приміщень і обладнання.

Ставкові теплообмінники встановлюються в природних або штучних водоймах, де температура води є більш стабільною, ніж температура повітря [14]. Теплообмін відбувається між водою та теплоносієм, який циркулює у замкненій системі та постачає тепло до опалювальних або вентиляційних систем. Використання ставкових теплообмінників є ефективним рішенням для господарств, що мають доступ до водойм із достатнім об'ємом води й мінімальним рівнем замерзання в зимовий період.

Тепловий насос вода – вода забезпечує ефективне використання тепла підземних або поверхневих вод для обігріву тваринницьких приміщень чи систем гарячого водопостачання [15]. Така система працює найбільш ефективно за умов стабільної температури водного ресурсу, що дає змогу підтримувати високий коефіцієнт перетворення енергії. Перевагою теплових насосів такого типу є їхня здатність працювати з високою ефективністю навіть за низьких зовнішніх температур, що робить їх придатними для використання в різних кліматичних зонах.

Тепловий насос стічних вод призначений для використання енергії, накопиченої у відпрацьованій воді, яка має підвищену температуру [16]. Такі системи найбільш ефективні в господарствах із великим обсягом теплої стічної води, що утворюється внаслідок санітарної обробки приміщень, приготування кормів та інших технологічних процесів. Використання теплових насосів цього типу дає можливість створити замкнений цикл теплопостачання, знижуючи залежність підприємства від традиційних джерел енергії.

Таким чином, використання теплової енергії води у тваринницьких приміщеннях дає змогу суттєво підвищити енергоефективність господарства завдяки раціональному використанню природних і вторинних ресурсів. Однак ефективність таких систем залежить від наявності відповідних водних об'єктів та їхньої температурної стабільності, що потребує ретельного проектування й адаптації до конкретних умов експлуатації.

Теплова енергія ґрунту. Ґрунт є стабільним джерелом низькопотенційної теплової енергії, що ефективно використовується для регулювання температури в тваринницьких приміщеннях.

У господарствах її застосування реалізується через систему геотермальних теплових насосів, які отримують тепло від ґрунту за допомогою горизонтальних або вертикальних колекторів.

Температура ґрунту на невеликих глибинах змінюється в незначному діапазоні протягом року, що дає змогу знизити витрати електроенергії порівняно з повітряними тепловими насосами. Завдяки цьому різниця температур між теплоносієм у контурі та середовищем, що обігрівається, залишається мінімальною, що підвищує ефективність системи в зимовий період [17].

Геотермальні системи не потребують високотемпературних джерел тепла, як-от природні термальні води, оскільки використовують тепло поверхневих шарів землі. Це робить їх доступними для широкого спектра регіонів.

Тепловий насос працює за схемою «ґрунт – вода», нагріваючи воду для системи опалення (радіатори, тепла підлога) або повітря у вентиляційних установках [18]. Улітку система може працювати в реверсному режимі, забезпечуючи охолодження приміщень.

Геотермальна вентиляція використовує ґрунтові теплообмінники для попереднього нагрівання або охолодження припливного повітря [19]. Через розташовані в ґрунті трубні контури прокачується припливне повітря, і завдяки різниці температур відбувається теплообмін між повітрям та ґрунтом. Завдяки цьому здійснюється терморегуляція повітря, що знижує навантаження на основні системи опалення та кондиціонування, сприяючи підтриманню стабільного температурного режиму у тваринницьких приміщеннях.

Таким чином, енергія ґрунту є одним із найбільш стабільних і ефективних джерел відновлюваної енергії для тваринницьких господарств. Незважаючи на високі початкові інвестиції, геотермальні теплові насоси забезпечують значну економію енергоресурсів у довгостроковій перспективі. В умовах суворого клімату або нестабільного електропостачання ця технологія може бути найефективнішим рішенням для забезпечення комфортного мікроклімату у тваринницьких приміщеннях, що сприятиме підвищенню продуктивності тварин та економічної рентабельності господарства.

На основі проведеного аналізу альтернативних джерел енергії та технічних засобів для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях було створено узагальнену схему (рис. 1).

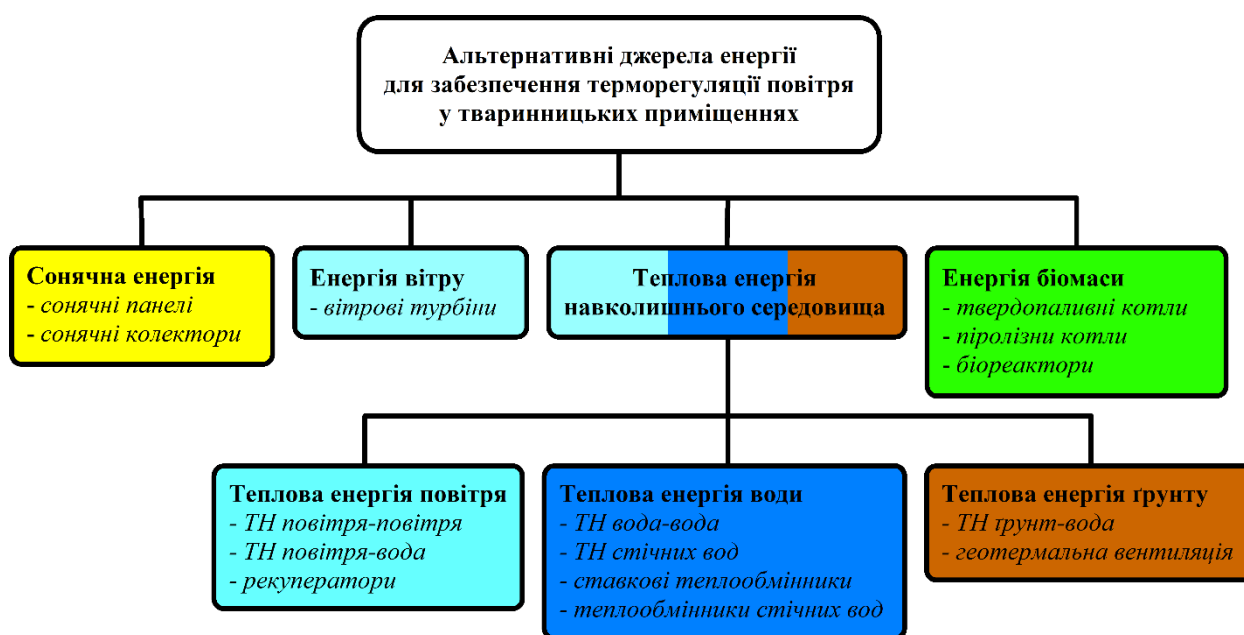


Рис. 1. Альтернативні джерела енергії та основні технічні засоби для терморегуляції повітря у тваринницьких приміщеннях

Висновки. Теплова енергія ґрунту, на відміну від сонячної та вітрової, не залежить від добових чи сезонних коливань погоди, що забезпечує її стабільність упродовж усього року. Порівняно з біомасою та біогазом вона не потребує постійної поставки сировини, що значно зменшує логістичні витрати та спрощує експлуатацію. Крім того, геотермальні системи вирізняються високою енергоефективністю, відсутністю потреби в паливі та можливістю не лише обігрівати приміщення, а й охолоджувати їх у теплий період. Завдяки цим характеристикам вони є одним із найбільш стабільних і перспективних рішень для терморегуляції великих тваринницьких комплексів, забезпечуючи економічну вигоду й екологічну безпечність у довгостроковій перспективі.

Список використаних джерел

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / ред. С. О. Кудря. 3-тє вид., оновл. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024.
2. Kudria S., Ivanchenko I., Tuchynskyi B., Petrenko K., Karmazin O., Riepin O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, № 1. P. 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.211>.
3. Atelge M.R., Krisa D., Kumar G., Eskicioglu C., Nguyen D.D., Chang S.W., та ін. Biogas production from organic waste: Recent progress and perspectives. *Waste and Biomass Valorization*. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00546-0>.
4. Lim T., Baik Y.-K., Kim D.D. Heating performance analysis of an air-to-water heat pump using underground air for greenhouse farming. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 15. P. 3863. <https://doi.org/10.3390/en13153863>.
5. Hayat M.B., Ali D., Monyake K.C., Alagha L., Ahmed N. Solar energy – A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International Journal of Energy Research*. 2018. Vol. 42, № 10. P. 3452–3475. <https://doi.org/10.1002/er.4252>.
6. Alkilani M.M., Sopian K., Alghoul M.A., Sohif M., Ruslan M.H. Review of solar air collectors with thermal storage units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 3. P. 1476–1490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.019>.
7. Hafez A.Z., Yousef A.M., Soliman A., Ismail I. A comprehensive review for solar tracking systems design in photovoltaic cell, module, panel, array, and systems applications. *IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*. 2018. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2018.8547901>.
8. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 5. P. = 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.
9. Basu P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. *Academic Press*, 2018.
10. Owamah H.I., Dahunsi S.O., Oranusi U.S., Alfa M.I. Fertilizer and sanitary quality of digestate biofertilizer from the co-digestion of food waste and human excreta. *Waste Management*. 2014. Vol. 34, № 4. P. 747–752. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.01.017>.
11. Калетнік Г., Яропуд В. Research of pressure losses and justification of forms of side-evaporative heat exchangers channels in livestock premises. *Przeegląd Elektrotechniczny*. 2023. Vol. 99, № 7. P. 247–252. <https://doi.org/10.15199/48.2023.07.46>.
12. Safijahanshahi E., Salmanzadeh M. Performance simulation of combined heat pump with unglazed transpired solar collector. *Solar Energy*. 2019. Vol. 180. P. 575–593. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.038>.
13. Hao X., Li J., van Loosdrecht M.C.M., Jiang H., Liu R. Energy recovery from wastewater: Heat over organics. *Water Research*. 2019. Vol. 161. P. 74–77. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.106>.
14. Novo A.V., Bayón J.R., Castro-Fresno D., Rodríguez-Hernández J. Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits. *Applied Energy*. 2010. Vol. 87, № 2. P. 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.033>.
15. Mun H.S., Dilawar M.A., Jeong M.G., Rathnayake D., Won J.S., Park K.W., et al. Effect of a heating system using a ground source geothermal heat pump on production performance, energy-saving, and housing environment of pigs. *Animals*. 2020. Vol. 10, № 11. P. 2075. <https://doi.org/10.3390/ani10112075/>.

16. Kordana-Obuch S., Wojtoń M., Starzec M., Piotrowska B. Opportunities and challenges for research on heat recovery from wastewater: Bibliometric and strategic analyses. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 17. P. 6370. <https://doi.org/10.3390/en16176370>.
17. Alshehri F., Beck S., Ingham D., Ma L., Pourkashanian M. Comparisons between ground and air source heat pumps in hot/dry climates: Saudi Arabia as a case study. *Journal of Building Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100825>.
18. Alberti L., Antelmi M., Angelotti A., Formentin G. Geothermal heat pumps for sustainable farm climatization and field irrigation. *Agricultural Water Management*. 2017. Vol. 197. P. 19–32. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.009>.
19. Patel P.D., Srivastava A.K., Chauhan H.D., Ankuya K.J., Prajapati R.K., Paregi A.B. Geothermal ventilation system for animal house: A new approach. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 2018. Vol. 7, № 6. P. 1850–1859. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.706.220>.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2025 р.

O. Koviazin¹, I. Chyzhykov¹, S. Dereza¹, A. Pastushenko²

¹Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University

**²Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
“Berezhany Agrotechnical Institute”**

ANALYSIS OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES FOR THERMOREGULATION OF AIR IN LIVESTOCK PREMISES

Summary

The article analyzes alternative energy sources that can be used for air thermoregulation in livestock buildings. The study examines the efficiency of solar and wind energy, biomass, biogas technologies, heat pumps, and heat recovery systems. The impact of these energy sources on the energy efficiency of livestock enterprises is assessed, considering their potential to reduce energy costs and their environmental benefits. The main advantages and limitations of each energy source are identified, taking into account their availability, technical feasibility, and the possibility of integration into modern agricultural technologies.

Special attention is paid to the adaptability of these technologies to different climatic conditions and their role in optimizing microclimate control in animal husbandry. The study highlights the growing importance of sustainable energy solutions in agriculture and the necessity of hybrid energy systems that combine multiple sources to ensure greater efficiency and reliability. The potential of solar and wind energy is particularly promising in regions with favorable climatic conditions, whereas bioenergy and geothermal systems provide more stable and continuous energy supply options, reducing dependence on fossil fuels.

Furthermore, the study discusses the economic and ecological advantages of implementing alternative energy solutions in livestock farms. It is established that geothermal systems are among the most stable and promising solutions for thermoregulation, as they are independent of seasonal fluctuations and provide high energy efficiency in the long term. The findings support the feasibility of integrating alternative energy sources into livestock farming to enhance sustainability, reduce operating costs, and minimize environmental impact.

Keywords: microclimate, solar energy, wind energy, bioenergy, geothermal systems, biogas, heat recovery, energy efficiency, sustainable development.