

УДК 636.083:631.95:504.3

ВПЛИВ ЕМІСІЇ СІРКОВОДНЮ ВІД ОБ'ЄКТІВ ТВАРИННИЦТВА НА ЯКІСТЬ ПОВІТРЯ РОБОЧОЇ ЗОНИ БУДІВЕЛЬ І ДОВКІЛЛЯ (оглядова)

М. С. Небилиця, О. В. Бойко, О. М. Гавриш, О. Ф. Гончар,
О. В. Волощук, Т. Г. Осокіна

Черкаська дослідна станція біоресурсів НААН (Черкаси, Україна)
вул. Пастерівська, 76, м. Черкаси, Україна, 18036

Небилиця М. С. ✉

nebilitsia@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0001-5509-8787>

Бойко О. В.

bioresurs.ck@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0002-3917-5583>

Гавриш О. М.

gavrish.olexandr@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8632-6508>

Гончар О. Ф.

of.gonchar@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0032-3269-9767>

Волощук О. В.

0970293469@ukr.net

<https://orcid.org/0009-0007-1999-864X>

Осокіна Т. Г.

osokina_t@ukr.net

<https://orcid.org/0009-0006-8840-9493>

Рукопис надійшов/
Manuscript was received

19.05.2025

Після рецензування/
Received after review

03.06.2025

Прийнято до друку/
Accepted for printing

28.06.2025

Доступно онлайн/
Available online

30.12.2025

Декларування конфлікту інтересів:

Не потрібно

Етичне схвалення:

Не застосовується



Attribution License 4.0
International (CC BY 4.0)



Мета. З'ясувати основні джерела викидів сірководню (H_2S) у тваринництві. Кількісно оцінити його рівні концентрації в повітрі робочої зони та коефіцієнти емісії в зовнішнє повітря. Оцінити токсичну дію H_2S на здоров'я тварин і людей за різних рівнів впливу. Визначити способи мінімізації забруднення сірководнем навколишнього середовища. **Методи.** Застосовано камеральний аналіз літературних, наукових, нормативних матеріалів та метод оцінювання для узагальнення напрацьованих даних. **Результати.** Згідно з літературними даними, сірководень є безбарвним, легкозаймистим газом із запахом тухлих яєць. Він важчий за повітря, тому найбільш небезпечний, коли утворюється в результаті розкладання органічних речовин у каналізаційних системах, вигрібних ямах та резервуарах для зберігання рідкого гною. Якщо не дотримуватися запобіжних заходів, сірководень може спричинити отруєння людей, які працюють на прибиранні та обслуговуванні цих споруд. Малоефективні системи зберігання та утилізації гною і птишиного посліду можуть призводити до накопичення H_2S та його викидів у зовнішнє середовище. Сірководень демонструє особливу поведінку вивільнення бульбашок у резервуарах з рідким гноєм. Є дані про неочікувані спалахи вивільнення H_2S через різке збільшення його концентрації у резервуарах для зберігання гною. Крім цього, збільшення концентрації H_2S відбувається у тваринницьких будівлях, особливо під час робіт з видалення гною. Це може призвести до накопичення високих концентрацій газу в повітрі робочої зони. За концентрації H_2S понад 100 ppm (часток на мільйон) нюхові рецептори повністю втрачають свої функції. Це робить запах газу неефективним попередженням про небезпеку. Негативні наслідки викидів H_2S проявляються токсичним впливом на здоров'я тварин і людей. Газ може викликати головний біль, нудоту, запаморочення, а в концентраціях понад 700 ppm – тяжке отруєння і смерть. Середньозважений рівень концентрації H_2S в повітрі робочої зони різних типів тваринницьких будівель переважно становить менше ніж 1000 ppm (часток на мільйон). Середньодобові коефіцієнти його викидів з приміщень для молочних корів перебувають в межах від 401 до 7162 мг/день на корову; з пташників – від 462 до 508 мг AU^{-1} (умовна одиниця, що дорівнює 500 кг живої маси тварин); зі свинарників – від 220 до 1250 мг AU^{-1} день⁻¹. Викиди H_2S з анаеробних лагун для зберігання рідкого гною свиней становлять 492,5 мг/м² день⁻¹. **Висновки.** Для зменшення викидів сірководню потрібно здійснювати заходи щодо впровадження ефективних систем утилізації гною, удосконалення вентиляції у тваринницьких приміщеннях та використання збалансованих раціонів годівлі тварин.

Ключові слова: сірководень, концентрація, викид, тваринницька будівля, робоча зона, рівень впливу, спосіб мінімізації забруднення.

Для цитування (за ДСТУ 8302:2025):

Небилиця М. С., Бойко О. В., Гавриш О. М., Гончар О. Ф., Волощук О. В., Осокіна Т. Г. Вплив емісії сірководню від об'єктів тваринництва на якість повітря робочої зони будівель і довкілля (оглядова). *Свинарство і агропромислове виробництво*: міжвідом. темат. наук. зб. / Інститут свинарства і АПВ НААН. Полтава, 2025. Вип. 5–6(83–84). С. 95–121. [https://doi.org/10.37143/2786-7730-2025-5-6\(83-84\)7](https://doi.org/10.37143/2786-7730-2025-5-6(83-84)7)

Вступ. Метою розвитку галузі тваринництва є забезпечення населення якісними продуктами харчування тваринного походження у необхідній кількості з мінімальним негативним впливом на довкілля.

Європейська Комісія у травні 2020 р. представила проєкт Стратегії ЄС «Від лану до столу», яка встановлює перехід до стійкої харчової системи ЄС, що гарантуватиме продовольчу безпеку та забезпечуватиме доступ до здорового харчування, дотримуючись умов захисту довкілля [1].

Викиди сірководню (H_2S) від тваринництва є серйозною проблемою, оскільки вони можуть негативно впливати на якість повітря робочої зони та здоров'я як самих тварин, так і людей. Крім того, викиди H_2S можуть негативно впливати на стан зовнішнього повітря та на екологічний стан довкілля загалом.

Сірководень є безбарвним, легкозаймистим газом із запахом тухлих яєць. Оскільки він важчий за повітря, найбільшу небезпеку становить при утворенні внаслідок розкладання органічних продуктів в каналізаційних стоках, вигрібних ямах та резервуарах для зберігання рідкого гною (за порушення заходів безпеки може спричинити отруєння людей, що працюють при очищенні та обслуговуванні цих споруд). При змішуванні із водою утворює токсичні випари. Сірководень блокує процеси кисневого обміну в клітинах через пригнічення активності цитохромоксидази, спричиняє перехід клітинного обміну речовин на анаеробний шлях і подальше накопичення молочної кислоти, викликає пошкодження центральної нервової системи [2].

Мета дослідження – з'ясувати основні джерела викидів H_2S у тваринництві, кількісно оцінити рівні його концентрації в повітрі робочої зони та коефіцієнти емісії в зовнішнє повітря, а також токсичну дію на здоров'я тварин і людей за різних рівнів впливу й способи мінімізації забруднення навколишнього середовища.

Матеріали та методи досліджень. Застосовано камеральний аналіз літературних, наукових, нормативних матеріалів та метод оцінювання для узагальнення напрацьованих даних. Також використано формально-логічний метод і порівняльний аналіз при дослідженні впливу емісії сірководню від об'єктів тваринництва на якість повітря робочої зони будівель і зовнішнього повітря.

Результати дослідження та їх обговорення

1. Основні джерела викидів сірководню у тваринництві

1.1. Біологічне розкладання гною та посліду. Свіжий гній або послід починає розкладатися з моменту потрапляння в навколишнє середовище. Сірководень утворюється внаслідок анаеробного розкладання в результаті мінералізації органічних сполук сірки, а також відновлення окиснених неорганічних сполук сірки, таких як сульфат, сірководновлявальними бактеріями [3]. Вищий вміст сульфатів у гної призводить до підвищення викидів H_2S [4].

За дії ферментів бактерій складні молекули гною розкладаються на простіші органічні сполуки з виділенням забруднювальних газів. Анаеробне розкладання типове для рідкого гною у вигрібних ямах і лагунах. Воно супроводжується виділенням аміаку, метану, вуглекислого газу, сірководню та низки інших забруднювачів повітря. У великих концентраціях вони можуть

бути дуже небезпечними для здоров'я та життя як тварин, так і людей, і сірководень є найнебезпечнішим.

1.2. Об'єкти тваринництва і місця накопичення та зберігання гною і пташиного посліду. Недостатньо ефективні системи зберігання та утилізації гною і пташиного посліду можуть призводити до накопичення H_2S та його викидів у повітря. Вплив на довкілля відбувається на всіх етапах технологічного процесу виробництва продукції тваринництва, але основна частка – за умови надмірного накопичення на тваринницьких підприємствах органічних відходів, що не проходять належної утилізації, очищення і знезараження. Сірководень є токсичним та дуже небезпечним у разі раптового вивільнення від об'єктів для зберігання гною, що може призвести до накопичення високих концентрацій в повітрі робочої зони.

Виділення в повітря сірководню при зберіганні гною в гноєсховищах становить від 0,6 до 72,0 мг/м³ [5] та до 14 ppm (parts per million або одна мільйонна частка) – під час неглибокого промивання гнойових ям [6] й до 36 ppm – коли гній перемішували під час видалення [7]. Величина викиду H_2S залежить від концентрації органічної речовини в рідкій фракції, температури та рН гною [3].

У роботі [7] автори досліджували викиди H_2S у режимі реального часу впродовж двох щорічних заходів з видалення гною. Для цього у центральній Айові був проведений моніторинг двох свинарських приміщень на 1000 голів з глибокими ямами й однорічним зберіганням гною в бетонній траншеї (резервуарі) глибиною 2,4 м під зоною перебування тварин. Результати показали, що концентрація H_2S , виміряна під час видалення гною, збільшувалася в середньому в 61,9 раза порівняно з його рівнем до видалення. Це збільшення зберігалось під час перемішування гною, яке відбувалося в середньому протягом 8 годин. Після завершення цього процесу концентрація сірководню зменшилася в середньому в 10,4 раза, порівняно з його рівнем до видалення.

У дослідженнях [8] повідомляється, що під час поводження з гноєм відбувається викид сірководню, проте отримати глобальні оцінки неможливо через нестачу достовірних даних. В літературі відсутні коефіцієнти викидів H_2S для більшості галузей тваринництва, за винятком свинарства [3]. Естонські вчені розраховували коефіцієнти викидів газу для анаеробних лагун за коефіцієнтами H_2S для свиней, припускаючи, що рН гною від усіх видів тварин однаковий. Проте, такий підхід вважається ненауковим [9]. Наразі немає даних про загальні викиди H_2S в Естонії. Згідно з базою даних дозволів на забруднення повітря в цій країні, викиди H_2S становлять 36 Гг/рік [10].

Сірководень характеризується високою нерівномірністю вивільнення бульбашок у резервуарах з рідким свинячим гноєм. У дослідженнях повідомляється про неочікувані спалахи вивільнення значної кількості H_2S та різке збільшення його концентрації в сховищах для зберігання гною [11] та будівлях для свиней, під час проведення заходів з видалення гною [7].

1.3. Системи вентиляції тваринницьких приміщень. Коли вентиляційне повітря з тваринницьких приміщень викидається назовні, H_2S та інші шкідливі речовини потрапляють у навколишнє середовище [12]. Застосовуючи механічну або комбіновану вентиляцію, яка нині набула широкого використання, можна ефективно контролювати якість повітря в

приміщенні для забезпечення належного добробуту тварин [13]. Згадані вище системи механічної вентиляції полегшують процес очищення вихідного та вхідного повітря, порівняно з виключно природною системою вентиляції, тим самим зменшуючи загальні викиди з приміщень для худоби та птиці [14, 15]. Погана робота системи вентиляції може призводити до накопичення H_2S у приміщеннях де утримуються тварини, що негативно впливає на їхнє здоров'я та продуктивність [16].

2. Рівні концентрації сірководню у тваринницьких будівлях.

У літературі недостатньо інформації про рівні концентрації H_2S у приміщеннях для сільськогосподарських тварин. За даними досліджень вчених Сеульського національного університету в приміщеннях для утримання телят сірководню не було, а в приміщеннях для утримання дорослої великої рогатої худоби його концентрація становила лише 0,8 ppm [17].

За результатами дворічного безперервного моніторингу, проведеного Ji-Qin Ni та ін. у 2012 р. [18], середні масові концентрації H_2S у пташниках для курей-несучок перебували в межах $26,4 \pm 17,6 - 41,2 \pm 31,5$ ppb (parts per billion або одна мільярдна частка). Потрібно зазначити, що високих масових концентрацій H_2S , зокрема 10 ppm (8 год TWA) і 15 ppm (15 хв STEL) за нормами OSHA (Управління з охорони праці США) [19] та 10 ppm (REL впродовж 10 хв) за нормами NIOSH (Національний інститут охорони праці США) [20], у цьому дослідженні вченими не було виявлено. Загальна середня масова концентрація H_2S у повітрі приміщення для утримання курей-несучок за даними досліджень [21] становила 19,7 ppb. Деяку більшу масову концентрацію цього газу – 40–100 ppb, було виявлено у пташнику для курчат-бройлерів [22].

За повідомленням Zhu та ін. масова концентрація H_2S у свинарнику, за нормальних умов експлуатації, становила від 500 до 1000 ppb [22]. Однак у дослідженнях [23], проведених у свинарниках для молодняку з живою масою від 6 до 68 кг, за утримання на ґратчастій підлозі з ванною глибиною 0,6 м, зазначається про коливання масової концентрації H_2S в межах від 0,1 до 5,7 ppm. За даними досліджень [24] встановлено такі середньозважені рівні масової концентрації H_2S у тваринницьких підприємствах: птахівництва – 0,33 ppm, з виробництва яловичини та молока – 0,26 ppm та з виробництва свинини – 0,01 ppm.

За даними [25] середньодобові коефіцієнти викидів H_2S від чотирьох багатопверхових пташників за дворічного безперервного моніторингу перебували в межах від 462 ± 37 до 508 ± 27 мг AU^{-1} (умовна одиниця = 500 кг живої маси тварин).

Вчені зі США досліджували масову концентрацію та швидкість викидів H_2S у приміщеннях для відгодівлі свиней з глибокою ванною та без неї, а також з ваннами, які були приблизно напівзаповнені (на висоту 1,3 м від повної глибини у 2,4 м). Автори визначали швидкість викидів газу за впливу нагрівання та без нагрівання будівлі за допомогою обігрівачів. При цьому масова концентрація H_2S перебувала в діапазоні від 221 до 1492 ppb з відповідними швидкостями викидів газу від 1,6 до 3,8 мг m^{-2} год^{-1} ($0,22 - 0,49$ г H_2S AU^{-1} день^{-1}). Коли свинарники були заповнені поголів'ям свиней, масова концентрація газу в повітрі робочої зони в середньому становила 423 ppb з рівнем викидів $9,4$ мг m^{-2} год^{-1} ($1,25$ г H_2S AU^{-1} день^{-1}) [26].

Нами також проведена низка досліджень з добового моніторингу забруднювальних газів робочої зони корівників, свинарників та крільчатників за порами року з використанням вимірювально-обчислювального комплексу (ВОК) “Аналізатор повітряного середовища електронний моноблоковий” (АПСЕ-М) [27–29]. Отримані результати свідчать про відсутність забруднення повітря сірководнем (2 клас небезпеки згідно з ДСТ 12.1.005-88) у масових концентраціях, що перевищують рівень 1000 ppb. Наші експериментальні дані узгоджуються з результатами досліджень Zhu та ін. [24], Justene Guarrasi та ін. [22] і Jihoon Park та інші [17]. Отже, для проведення досліджень з моніторингу масової концентрації H₂S в робочій зоні тваринницьких приміщень бажано мати засоби вимірювання з роздільною здатністю одна мільярдна частка (млрд⁻¹).

За повідомленням Bogan B. W. та ін., даних про викиди H₂S від молочних ферм донедавна було недостатньо, однак ці прогалини заповнило Національне дослідження з моніторингу викидів у повітря (NAEMS). Були проведені довгострокові вимірювання викидів масової концентрації H₂S на ділянках за різних систем видалення гною. Дані (табл. 1) свідчать про те, що середні коефіцієнти викидів H₂S коливалися в межах від 401 до 7162 мг/день на одну корову та в середньому були більшими в 5,2 раза за змивної системи видалення гною з приміщення [30].

Таблиця 1. Викиди сірководню з приміщень для молочних корів з безприв'язним утриманням, в середньому за чотири пори року

Система вентиляції	Ділянка	Спосіб видалення гною	Викиди, мг/день на корову	Довідка про авторське цитування
механічна	NY5B	скрепер	964±1137	Bogan B. W. et al., 2010 [31]
механічна	IN5B	скрепер	1065±522	Lim T.T., et al., 2010 [32]
механічна	WI5B	траншея / змивний	7162±5373	Cortus, et al., 2010 [33]
механічна	WI5B	скрепер	401±358	Cortus et al., 2010 [33]
природна	WA5B	траншея / змивний	1307±651	Ramirez J.C. et al. 2010 [34]

3. Негативні наслідки викидів сірководню

Такі наслідки виявляються у токсичному впливі на здоров'я тварин і людей, а також у забрудненні довкілля. За умови, коли H₂S виділяється у вигляді газу, він залишається існувати в атмосфері протягом приблизно 1 доби влітку та 42 діб взимку, перетворюючись на діоксид сірки та сірчану кислоту [35]. Газоподібний H₂S є однією з найпоширеніших небезпечних речовин, пов'язаних із гострими отруєннями на виробництві [36, 37]. Проте існують деякі аспекти токсичності H₂S, які залишаються маловідомими. Тому потрібно розглянути окремі прогалини в знаннях, пов'язані з випадками наявності H₂S в навколишньому середовищі та його токсичного впливу на тварин і людей при вдиханні.

3.1. Токсикометрична оцінка впливу сірководню на здоров'я тварин. Сірководень може викликати подразнення дихальних шляхів, неврологічні розлади, а у високих концентраціях спричинити загибель тварин. Дослідженнями [38] експериментально доведено, що H₂S є

подразливим чинником ураження очей у людей і тварин. В Альбертському університеті Канади у телят, які зазнали впливу 20 ppm H₂S впродовж одного тижня, експериментально було викликане незворотне пошкодження очей та фотофобія [39]. Michal F. V. [40] під час мікроскопічного дослідження рогівки ока щура виявив ядерний пікноз, набряк та розшарування клітин після впливу H₂S за масової концентрації 36 ppm впродовж 3 годин. Крім того, Альбертський екологічний центр (Канада) задокументував клінічне подразнення очей в щурів у результаті впливу H₂S за концентрації 40 ppm впродовж 6 годин [41].

За повідомленням [42] кролики втрачали свідомість після вдихання повітря за масової концентрації сірководню в 72 ppm через 1,5 години. Впродовж 90-денних досліджень щури ліній F-344 та Sprague-Dawley піддавалися впливу H₂S за масової концентрації до 80 ppm тривалістю 6 год на день протягом 5 днів на тиждень, при цьому летальних випадків не спостерігалось [43]. Також не спостерігали загибелі серед 30 дорослих мишей лінії СВ-20, які зазнали впливу H₂S у концентрації 100 ppm впродовж 2 годин на день [44] та серед 20 дорослих мишей лінії NMRI, яких піддавали впливу аналогічної масової концентрації H₂S впродовж більш тривалого періоду (протягом 1 – 4 днів) [45]. Не повідомлялося про летальні випадки й в дослідженнях на щурах лінії Вістар за впливу H₂S з масовою концентрацією до 500 ppm впродовж 2 годин [46]. Однак, загибель фіксували у 50 % піддослідних особин щурів ліній Sprague-Dawley, F-344 та Long Evans при вдиханні ними повітря з масовою концентрацією сірководню 335–587 ppm впродовж 2 – 6 годин [47, 48]. Хоча в іншому дослідженні [49], за використання щурів F-344, смертність була меншою за аналогічного діапазону концентрації сірководню.

При вдиханні повітря з масовою концентрацією H₂S 500 – 700 ppm усі щури лінії F-344 загинули впродовж 4 год, однак за аналогічних умов утримання, за впливу концентрації H₂S до 400 ppm – жодна тварина не загинула [50–53]. Усі самці щурів лінії Вістар загинули після 12 хв вдихання повітря з масовою концентрацією H₂S 800 ppm [54]. П'ять японських білих кроликів загинули після 30 хв вдихання повітря з концентрацією H₂S 500 – 1000 ppm [55]. У дослідженні [56] повідомляється, що вплив H₂S з масовою концентрацією 1872 ppm на 6 особин мишей призвів до їх смерті за 10 хв, а за концентрації 722 ppm – за 50 хвилин. Дослідження, проведені на лабораторних тваринах, які зазнали впливу високих масових концентрацій H₂S, дали подібні летальні результати, що мали місце і при трагічних випадках з людьми. Зокрема, вплив H₂S за масової концентрації 1655 ppm та тривалості експозиції 3 хв був смертельним для всіх 5 щурів Sprague-Dawley [57].

3.2. Токсикометрична оцінка впливу сірководню на здоров'я людей. Фонові концентрації H₂S у повітрі зазвичай коливаються від 0,11 ppb до 0,33 ppb. Наприклад, концентрація цього газу в міських районах може сягати до 1 ppb [58]. Гранично допустима концентрація (ГДК) H₂S в повітрі робочої зони тваринницьких приміщень згідно ВНТП становить 3,5 – 7,0 ppm (1 ppm = 1,42 мг/м³ за НУ) [59–61].

Сірководень має дуже сильний запах з низьким нюховим порогом – від менш ніж 10 до 300 ppb, залежно від індивідуальної чутливості. За масової концентрації близько 30 ppb його можуть відчувати понад 80 % населення [62]. За даними Saeedi A. та ін. [63] тривалий вплив сірководню у навколишньому середовищі у концентрації до 90 ppb впродовж 1 – 30 років

спричиняє негативні наслідки для здоров'я людини. За концентрації від 1 до 5 ppm запах газу стає дуже неприємним, як у тухлих яєць [64]. Таким чином, за рівнів масової концентрації від 1 до 20 ppm газ має хороші попереджувальні властивості.

Guidotti Tee L. [64] зазначає, що за випадкового впливу високих масових концентрацій, сірководень має слабкі попереджувальні властивості, оскільки сприйняття запаху зникає через параліч нюху, який є сенсорним проявом нейротоксичності. Так, за масової концентрації H₂S 100 ppm нюхові рецептори втрачають повністю свої функції вже через 2 – 15 хв, що робить запах газу неефективним попередженням про велику небезпеку. У таблиці 2 наведено орієнтовні токсикометричні пороги сірководню для основних ефектів.

Таблиця 2. Токсикометрична дія сірководню на здоров'я людини за різних орієнтовних рівнів впливу (за Guidotti Tee L., 2010 [64] в нашій модифікації)

Концентрація (ppm)	Рівень впливу	Ефект
0,0003–0,001	Мінімальний	Фонові концентрації H ₂ S у повітрі
0,01–0,30	Мінімальний	Поріг сприйняття запаху (дуже мінливий)
0,4–1	Хронічний	Очікувані симптоми впливу можуть включати порушення зору, нюхову втому, нудоту, подразнення дихальних шляхів і можливі головні болі
1–5	Хронічний	Помірний неприємний запах, може супроводжуватися нудотою, слезотечею, головним болем або втратою сну при тривалому впливі; здорові молоді учасники чоловічої статі не відчувають зниження максимальної фізичної працездатності
6–9	Допустимий	За короткочасної дії (кілька годин), зазвичай добре переноситься здоровими дорослими
10	Допустимий	8-годинний гранично допустимий рівень професійного впливу в Альберті й OSHA PEL; поріг анаеробного метаболізму під час фізичного навантаження
15	Підгострий	15-хвилинний граничний рівень професійного впливу в Альберті
20	Підгострий	Максимально допустимий рівень професійного впливу під час евакуації в Альберті, дуже сильний запах; можливий кон'юнктивіт
20–50	Підгострий	Кон'юнктивіт та подразнення легень. Можливе пошкодження очей після кількох днів впливу; може спричинити розлад травлення та втрату апетиту
100	Підгострий	Подразнення очей та легень; параліч нюху, зникнення запаху
150–200	Підгострий	Паралізований нюх; сильне подразнення очей і легень
250–300	Підгострий	Може викликати набряк легень, особливо за тривалого впливу
500	Гострий	Серйозне пошкодження очей протягом 30 хв; сильне подразнення легень; «нокадаун» (раптова втрата свідомості) та смерть впродовж 4–8 годин; амнезія на весь період впливу
600–900	Гострий	Втрата свідомості та смерть можуть настати майже миттєво, ймовірно, через серцево-легеневий параліч
1000	Гострий	Дихання може зупинитися впродовж 1 або 2 вдихів; миттєвий колапс

*Примітка**. Аббревіатура: OSHA – Управління з охорони праці та здоров'я; PEL – допустима межа впливу.

Отже, сірководень може викликати головний біль, нудоту, запаморочення, а у великих масових концентраціях – тяжке отруєння і смерть. У підвищених масових концентраціях (700 ppm) H₂S спричиняє загальне отруєння, призводить до паралічу дихального і судинорухового центрів (токсична дія). За тривалого вдихання незначної кількості газу ослаблюється весь організм, знижується його резистентність, що сприяє виникненню вторинних захворювань (метатоксична дія) у людей.

У таблиці 3 наведено застосовні стандарти впливу та рекомендації щодо сірководню, оприлюднені різними органами влади, починаючи зі стандартів професійного впливу та закінчуючи стандартами для громад.

Таблиця 3. Застосовні стандарти й рекомендації щодо сірководню у США, Канаді, Європейському Союзі, ВООЗ та Україні* (за Guidotti Tee L., 2010 в нашій модифікації) [64]

Агентство	Стандарт або рекомендація	Застосування	Рівень впливу, ppm або ppb
Бюро трудових стандартів Міністерства праці США, 1966	Допустима межа впливу	OSHA має 3 різні PEL, залежно від типу галузі, такі як 8-годинне «середньозважене за часом» (TWA) або граничне значення (Ceil, Межа стелі**)	Загальна промисловість – 10 ppm; TWA Морська (включно з суднобудівними заводами) – 10 ppm; TWA Будівництво – 20 ppm; (Стеля)
	Граничні значення (межі стелі)	Стеля та Стеля+, як прийнятний максимальний піковий рівень впливу вище граничного значення протягом 8-годинної зміни, що може траплятися лише один раз впродовж зміни	Стеля – 20 ppm (10 хв); Стеля+ – 50 ppm (10 хв)
Європейський Союз, 2009	Орієнтовні гранично допустимі значення професійного впливу (ГДВ, IOELV)	Керівні принципи щодо професійного впливу	8 годин; TWA 5 ppm STEL (15 хв) 10 ppm
Американська конференція урядових промислових гігієністів (ACGIH), 2006	Порогове граничне значення (TLV)	8-годинна середньозважена добова норма (TWA).	1 ppm
	Короткострокова гранично допустима концентрація (STEL)	Максимально допустима кількість – до 4 випадків за 8-годинну зміну, між якими має бути перерва не менш як 60 хв	5 ppm
Національний інститут охорони праці та здоров'я США	Рекомендована гранична величина впливу (REL)	Рекомендація щодо перегляду стандартів OSHA та як керівництво для галузі	Стеля: 10 ppm (10 хв)
	Безпосередньо небезпечно для життя та здоров'я (IDLH)	Потрібен респіратор із подачею повітря та повнолицевою маскою; автономний дихальний апарат (АДА)	100 ppm
Рада з питань енергетики та комунальних послуг Альберти, 2003 (Канада)	Керівництво з планування дій у надзвичайних ситуаціях (для готовності громади)	Спричиняє евакуацію, пошук укриття або займання в джерелі під час неконтрольованих подій, таких як витоки з трубопроводів та вибухи нафтових свердловин	«Наближається» до 20 ppm (в середньому 3 хв)

Продовження табл. 3

Агентство	Стандарт або рекомендація	Застосування	Рівень впливу, ppm або ppb
Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA), тимчасова версія	AEGL 3: керівний рівень гострого впливу, рівень 3. AEGL використовується як керівництво в надзвичайних або неконтрольованих ситуаціях	У населення загалом, включаючи вразливих осіб, можуть виникнути загрозливі наслідки для здоров'я або смерть	Час експозиції: 10 хв 76 ppm 30 хв 59 ppm 60 хв 50 ppm 4 год 37 ppm 8 год 31 ppm
	AEGL 2: рівень гострого впливу, рівень 2	Населення загалом, включаючи вразливих осіб, може відчувати незворотні та/або серйозні, тривалі негативні наслідки для здоров'я або порушення здатності до порятунку	Час експозиції: 10 хв 41 ppm 30 хв 32 ppm 60 хв 27 ppm 4 год 20 ppm 8 год 17 ppm
	AEGL 1: керівництво щодо гострого впливу, рівень 1	Загальне населення, включаючи схильних до цього осіб, може відчувати дискомфорт, подразнення або безсимптомні ефекти, поза межами сенсорного сприйняття; ефекти є оборотними, тимчасовими та не призводять до інвалідизації	Час експозиції 10 хв 0,75 ppm 30 хв 0,60 ppm 60 хв 0,51 ppm 4 год 0,36 ppm 8 год 0,33 ppm
Агентство США з токсичних речовин та реєстру захворювань (ATSDR), 2006, 2002	Мінімальний рівень ризику	Рівень, за якого щоденний вплив на людину, ймовірно, буде без помітного ризику щодо негативного впливу на здоров'я	Гострий 14 днів (0,07 ppm) Середній 15–364 днів (0,02 ppm) Хронічний >364 днів (немає)
Каліфорнія, 1969 (США)	Стандарт якості атмосферного повітря в Каліфорнії	Макимум 60 хв для усунення подразнювального запаху	30 ppb
Альберта, 1975 (Канада)	Мета – якість повітря в Альберті	На основі подразливого запаху (ppbv– частин на мільярд за об'ємом)	24-годинний середній показник (3 ppbv) 1-годинний середній показник (10 ppbv)
Всесвітня організація охорони здоров'я, 1981	Керівництво з якості повітря	Рівень, за якого населення захищене від подразнення очей (24 год) або запаху (30-хвилинний пік)	24 год (10,6 ppb) 30 хв (5 ppb)
Міністерство охорони здоров'я України, 2024	Наказ МОЗ України від 10.05.2024 №813, https://moz.gov.ua/	ГДК для повітря населених місць ГДК м.р. = 0,008 мг/м ³	0,0056 ppm
Міністерство охорони здоров'я України, 2024	Наказ МОЗ України від 09.07.2024 №1192, https://moz.gov.ua/	ГДК для повітря робочої зони становить 10 мг/м ³ для середньозмінного значення за 8 годин та 0,02 мг/м ³ (примежова зона) за 15 хв (макс. одноразова), а для дихання — < 0,01 мг/м	17,15 ppm

Примітка: * - Вебсайти перелічених органів влади станом на 1 липня 2010 р., джерело [64]; **Межа стелі – це ліміт впливу, який працівник ніколи не повинен перевищувати, згідно ОСНА.

За даними Helmy N. та ін. [65] сірководень є третім виявленим газотрансмітером. Цей сульфід, як і два інші газопереносники (NO та CO), має ті ж самі інгібіторні властивості щодо мітохондріального дихання. Однак, на відміну від NO та CO, H₂S у концентраціях нижчих за токсичний рівень (< 10 мкМ) є донором водню та субстратом для мітохондріального дихання. Це пов'язано з активністю сульфідхінонредуктази (SQR), що міститься у переважній більшості мітохондрій.

Отже, на основі зазначеного вище, потрібно звертати увагу спеціалістів на небезпечність рівнів масової концентрації сірководню, які є більшими від ГДК. З метою запобігати можливим випадкам інтоксикації цим газом тварин та обслуговчого персоналу на виробництві, потрібно суворо дотримуватися заходів безпеки згідно з нормативними положеннями та законодавчими актами при роботі з отруйними, горючими й вибухонебезпечними речовинами. Крім цього, тваринницьким підприємствам бажано мати спеціалізовані електронні засоби з функціями звукового та світлового попередження про небезпеку та виносними зондами (довжиною від 3 до 5 м) для відбору проб забрудненого повітря. Без них неможливо якісно відстежувати небезпечні рівні концентрації H₂S при виконанні робіт на потенційно небезпечних ділянках тваринницьких об'єктів, зокрема спорудах для накопичення та зберігання рідкого гною.

3.3. Забруднення навколишнього середовища. Відновлені сполуки сірки та леткі жирні кислоти сприяють викидам запахів, які можуть викликати негативні фізичні та психологічні реакції у людей, що проживають за вітром від об'єктів, що викидають сірку. Сполуки сірки, що викидаються в атмосферу, зрештою утворюють сульфатні аерозолі та кислотні сполуки (тобто сірчану або метансульфонову кислоту), які перебувають переважно у вигляді аерозольних частинок субмікрометрового розміру. Відкладення сульфатної кислоти також може бути шкідливим для екосистем, завдаючи шкоди водним тваринам і рослинам, а також пошкоджуючи широкий спектр наземних рослин [66].

Крім цього, у додатково проведених екологічних дослідженнях [67], повідомляється про неврологічні ефекти, які мали місце в громадах поблизу промислових джерел сірководню. У мешканців, які проживали поблизу лагуни зі свинячим гноєм, спостерігалися зміни в тестах на рівновагу (коливання з відкритими або закритими очима), розпізнавання кольорів, показниках поля зору, когнітивних функціях та часу реакції, порівняно з контрольною групою мешканців з іншого штату.

Сірководень споживається бактеріями, що знаходяться в ґрунті та воді, які окиснюють його до елементарної сірки. Фотосинтезувальні бактерії можуть окиснювати сірководень до сірки та сульфату за наявності світла та відсутності кисню [68, 69]. Розкладання сірководню в атмосфері може відбуватися шляхом окиснення киснем (O₂) та озоном (O₃) з утворенням діоксиду сірки (SO₂) і, зрештою, сульфатних сполук. Діоксид сірки та сульфати видаляються з атмосфери шляхом поглинання рослинами та ґрунтами або через опади [70].

Ефективний час життя сірководню, заснований на літніх денних та середньорічних концентраціях гідроксильних радикалів, оцінюється в 0,23 та 2,3 дня відповідно, виходячи з вимірної константи швидкості $4,8 \times 10^{-12} \text{см}^3/\text{молекула-секунда}$. Малоімовірно є твердження, що

сірководень не буде мати значного впливу на навколишнє середовище шляхом прямого поглинання ультрафіолетового випромінювання і його реакції з озоном [71].

Окиснення сірководню за допомогою O_2 може відбуватися у поверхневих водах [72, 73]. Сірководень є легкокорозивним у воді. У водному розчині він є слабкою кислотою, що демонструє дві константи кислотної дисоціації. Перша дисоціація дає гідрогенсульфід-іон (HS^-), а друга – сульфід-іон (S^{2-}), зі значеннями pK_a для кожної з цих дисоціацій 7,04 та 11,96 відповідно [74].

Наявність сірководню у воді можна визначити за неприємним запахом, що з'являється внаслідок життєдіяльності анаеробних бактерій, які перетворюють сполуки сірки (сульфати та сульфіди) в сірководень. Зокрема, при бактеріальному розкладанні та біохімічному окисненні органічних речовин природного походження (детрит, органічні добрива) й в результаті надходження органіки із поверхневими водами. Через високу токсичність сірководень та його сполуки (гідросульфіди та сульфіди) небезпечні для гідробіонтів. Крім того, при синтезуванні цього газу та його сполук виникає гострий дефіцит кисню. При цьому часто фіксуються замори риби [75, 76].

Отже, головним напрямом екологізації виробничих процесів у тваринництві потрібно вважати перехід до використання замкнених технологій. Використання відходів тваринництва має такі основні напрями: повернення відходів у той самий виробничий процес з якого його отримано (у вигляді кормових добавок); використання відходів в інших виробничих процесах (як органічних добрив у землеробстві); використання у вигляді сировини для інших виробництв (для одержання біогазу (метану)).

4. Економічні проблеми

Забруднення довкілля сірководнем може призвести до проблем із сільськогосподарським виробництвом. Проведені дослідження [77], свідчать, що високі концентрації сірководню можуть суттєво пошкодити посіви й знизити врожайність сільськогосподарських культур. Це безпосередньо впливає на зниження прибутковості сільськогосподарського виробництва та об'ємів виробництва продуктів харчування для людей.

5. Безпека життєдіяльності

За даними [78] сірководень є високотоксичним, вибухонебезпечним (при концентрації 4,3 – 45,0 % за об'ємом у повітрі) та легкозаймистим (температура займання $260^{\circ}C$) газом. Крім цього, існує висока ймовірність вибуху суміші сірководню і кисню в закритому приміщенні, тому його наявність може створювати ризики для безпеки життя людей та збереження майна. Через це тваринницькі підприємства, зокрема великі комплекси та ферми, мають подбати про забезпечення безперебійного електроживлення (наявність автономних засобів електропостачання на випадок аварійних відключень централізованих джерел). Воно необхідне для забезпечення стабільної роботи систем вентиляції для безпеки життєдіяльності людей і добробуту тварин в закритих приміщеннях.

6. Заходи для зменшення викидів сірководню

6.1. Впровадження ефективних систем поводження з гноєм.

В університеті штату Айова (США) були проведені дослідження [79], спрямовані на розроблення технології зменшення короткострокових викидів H_2S при перемішуванні рідкого гною за використання гранул біовугілля.

Установлено, що масова концентрація цього газу в повітрі за таких умов знизилася з 48,1 до 20,8 ppm, що еквівалентне зменшенню максимальної концентрації H_2S під час тригодинного перемішування гною на 57 %.

У дослідженні Jisoo Wi та ін. [80] в режимі реального часу вимірювали концентрацію H_2S у свинарнику зі звичайною гідравлічною гнойовою ванною під ґратчастою підлогою (контроль) та свинарнику з напівбезперервною системою поповнення ванни, де загальна кількість поповненого аеробно обробленого рідкого гною за добу становила приблизно 7,3 % від загальної кількості гною, що зберігався у ванні (дослід). Діапазон концентрації H_2S у контрольному приміщенні становив від 488 до 2310 ppbv, тоді як у дослідному свинарнику він був значно меншим – від 84 до 1378 ppbv. Також дослідження щодо оцінки напівбезперервної системи поповнення ванни для зменшення викидів сірководню зі свинарника для свиней на відгодівлі проводилося впродовж двох тижнів на комерційній свинофермі в Республіці Корея. Середнє скорочення викидів H_2S у цьому випадку становило $82,0 \pm 7\%$ ($p < 0,00001$) [80].

Українськими вченими [81] встановлено ефективний вплив біопрепарату Капельюхів Яроч на рівень виділення H_2S з курячого посліду за мезофільного режиму бродіння в анаеробних умовах *in vitro*. Він зумовлює зниження емісії газу на 10,1 – 18,3 %. Проведені дослідження свідчать про можливість використання даного біопрепарату для зниження емісії токсичних газів і запобігання забрудненню навколишнього природного середовища під час зберігання посліду на птахофабриках у сховищах (лагунах).

Установки, що обробляють гній, також можуть викидати в повітря сірководень. Так при вимірюванні викидів H_2S з двох анаеробних лагун, що використовувалися для обробки відходів свинарства, загальне середнє виділення сірководню становило 5,7 мг/м²/с [82, 83].

6.2. Впровадження ефективних систем утилізації відходів.

Використання сучасних систем знешкодження гною та посліду, таких як біогазові установки, може значно зменшити викиди сірководню.

У 21-му столітті біогазові технології стали стандартом очищення стічних вод та перероблення сільськогосподарських і твердих відходів. Потенціал генерації біометану в Україні становить 2 – 7 млрд м³ на рік, або 25 % від поточного споживання газу [84]. Відходи від аграрного сектору можуть призводити до викидів парникових газів та інших забруднень у навколишнє середовище. Ці відходи є складними для утилізації або обробки, проте їх можна використовувати як сировину для виробництва біогазу [85].

Біомаса, як сировина для виробництва біогазу, дає змогу зменшити обсяги відходів та отримати додаткові економічні вигоди [2]. Однак процес виробництва біогазу не позбавлений екологічних проблем, серед яких однією з найважливіших є наявність сірководню у вихідній суміші газів. Сірководень негативно впливає на обладнання біогазових установок, через корозію та зниження ефективності процесу виробництва біогазу. Вміст H_2S у біогазі зазвичай коливається від 50 до 5000 ppmv, але в деяких випадках може сягати 20 000 ppmv (2 % об./об.). Крім того, високі концентрації H_2S у біогазі можуть призвести до підвищення викидів шкідливих речовин при його спалюванні. Тому важливим завданням є

розробка та впровадження ефективних методів біологічного очищення біогазу від сірководню [86–90].

Відомі біотехнологічні методи утилізації, які використовують бактерії здатні окиснювати H_2S . Вони працюють у спеціальних біореакторах або біофільтрах. Найбільш уживаними є бактерії роду *Thiobacillus*, які перетворюють сірководень на елементарну сірку або сульфати. Значного поширення набули біофільтри з наповнювачем, на якому закріплені бактерії, що живляться H_2S . Біологічні методи є екологічно безпечними, але мають обмеження за швидкістю очищення і чутливістю до температури та pH [91].

6.3. Удосконалення вентиляції у тваринницьких приміщеннях.

Забезпечення ефективної вентиляції у тваринницьких приміщеннях дає змогу зменшити концентрацію сірководню у повітрі. Вентиляція або повітрообмін розбавляє масову концентрацію газу у визначеному просторі [92, 93]. Проведені дослідження показали, що біофільтри на основі деревної кори й поживного синтетичного матеріалу (UP20) в поєднанні з волокнистим торфом для обробки H_2S (до 280 ppmv) можуть бути перспективною технологією для зменшення викидів аерозолів із закритих свинарських приміщень. Зменшення викидів H_2S за таких умов досягає 95,2 – 100,0 % [94, 95].

У просторі над гноєм у закритих гноєсховищах зазвичай накопичується велика кількість H_2S , особливо під час порушення технології зберігання гною. У поєднанні з недостатньою швидкістю вентиляції, закриті гноєсховища стали на фермах місцями з найвищим ризиком отруєння цим газом [96]. Отже, важливість вентиляції у тваринництві, особливо під час роботи з гноєм, не можна переоцінити, оскільки це може бути питанням життя і смерті [97].

6.4. Використання збалансованих раціонів годівлі. Ретельне балансування раціонів може зменшувати утворення сірководню у кишківнику тварин. Shule Liu та ін. [98] досліджували викиди H_2S впродовж повного циклу утримання свиней на відгодівлі, де поголів'я тварин 12 свинарників було розділене на три групи. Одних годували стандартним кормом (контрольна група), тварин інших двох груп – кормом зі зниженим вмістом сирого протеїну в раціоні, відповідно на 2,1–3,8 % (T_1) та 4,4 – 7,8 % (T_2). Середні показники викидів H_2S за цикл становили $4,0 \pm 2,9$; $4,3 \pm 3,2$ та $5,4 \pm 4,0$ г/д⁻¹AU⁻¹ відповідно для контрольної та дослідних груп T_1 і T_2 . Тобто викиди H_2S вірогідно збільшилися на 10,0 та 36,7 % ($p < 0,001$) відповідно для груп T_1 та T_2 .

Висновки. Огляд джерел літератури щодо узагальнення даних про H_2S дає змогу заповнити окремі прогалини в сучасних знаннях науковців та фахівців виробництва тваринницької продукції. Основними джерелами викидів сірководню в навколишнє середовище, шляхом природної чи механічної систем вентиляції, є біологічне розкладання гною у приміщеннях, місцях і об'єктах накопичення та зберігання гною (чи пташиного посліду). Негативні наслідки викидів H_2S проявляються його токсичним впливом на здоров'я тварин і людей. Газ може викликати головний біль, нудоту, запаморочення, а в концентраціях понад 700 ppm – тяжке отруєння і смерть. Середньозважений рівень концентрації H_2S в повітрі робочої зони різних типів тваринницьких будівель становить переважно менше ніж 1000 ppb. Середньодобові коефіцієнти викидів сірководню з приміщень для молочних

корів перебувають в межах від 401 до 7162 мг/день на корову; з пташників – від 462 до 508 мг AU⁻¹; зі свинарників – від 220 до 1250 мг AU⁻¹ день⁻¹. Викиди H₂S з анаеробних лагун для зберігання рідкого гною свиней становлять 492,5 мг/м²день⁻¹. Заходи щодо зменшення викидів сірководню у тваринництві потрібно здійснювати шляхом впровадження ефективних систем утилізації гною, удосконалення системи вентиляції тваринницьких приміщень та використання збалансованих раціонів для годівлі тварин.

Перспективи подальших досліджень. Провести експериментальні дослідження щодо порівняльної оцінки середньодобових коефіцієнтів емісії сірководню від об'єктів зберігання підстилкового та рідкого гною, в умовах України, за різних паратипних факторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. *Офіц. сайт Мін-ва захисту довкілля та природних ресурсів України*. 514 с. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення: 25.04.2025).
2. Сірководень. *Empendium*: портал для лікарів. URL: <https://empendium.com/ua/manual/chapter/B72.XIII.C.14> (дата звернення: 25.04.2025).
3. Emissions from animal feeding operations / U.S. Environmental Protection Agency Emission Standards Division Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, NC 27711. 2001. August 15. P. 32–33. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/draftanimalfeed.pdf> (дата звернення: 25.04.2025).
4. Arogo J., Zhang R. H., Riskowski G. L., Day D. L. Hydrogen sulfide generation from stored liquid swine manure: a laboratory study. *Transactions of the ASAE*. 2000. Vol. 43(5). P. 1241–1245. <https://doi.org/10.13031/2013.3017>
5. Системи видалення, обробки, підготовки та використання гною: ВНТП-АПК-09.06 [Чинні від 01.06.2006] / Мінагрополітики України. Київ. 2006. 55 с. URL: <https://agro.vobu.ua/wp-content/uploads/2021/11/VNTP-APK-09.06.pdf> (дата звернення: 29.04.2025).
6. Lim T.-T., Heber A. J., Ni J.-Q., Kendall D., Richert B. T. Effects of manure removal strategies on odor and gas emission from swine finishing. *Transactions of the ASAE*. 2004. Vol. 47(6). P. 2041–2050. <https://doi.org/10.13031/2013.17801>
7. Hoff S. J., Bundy D. S., Nelson M. A., Zelle B. C., Jacobson L. D., Heber A. J., Ni J.-Q., Zhang Y. H., Koziel J. A., Beasley D. B. Emissions of ammonia, hydrogen sulfide, and odor before, during and after slurry removal from a deep-pit swine finisher. *J. of the Air & Waste Management Association*. 2006. Vol. 56. P. 581–590. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464472>
8. Aneja V. P., Blunden J., Roelle P. A., Schlesinger W. H., Knighton R., Niyogi D., Gilliam W., Jennings G., Duke C. S. Workshop on agricultural air quality: state of the science. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. Iss. 14. P. 3195–3208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.043>
9. Atia A., Haugen-Kozyra K., Amrani M. Ammonia and hydrogen sulfide emissions from livestock production / Alberta Agriculture, Food and Rural Development. 2004. P. 229–272. URL: [https://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/epw8313/\\$file/chapter7.pdf](https://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/epw8313/$file/chapter7.pdf) (дата звернення: 25.04.2025).
10. Maasikmets M., Teinema E., Kaasik A., Kimmel V. (2015). Measurement and analysis of ammonia, hydrogen sulphide and odour emissions from the cattle farming in Estonia. *Biosystems engineering*. 2015. Vol. 139. P. 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.002>
11. Blanes-Vidal V., Guàrdia M., Dai X. R., Nadimi E. S. NH₃, CO₂ and H₂S emissions during swine wastewater management: characterization of transient emissions after air-liquid interface disturbances. *Atmos. Environ.* 2012. Vol. 54. P. 408–418 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.046>

12. Van Huffell K., Hansen M. J., Feilberg A., Liu D., Van Langenhove H. Level and distribution of odorous compounds in exhaust air of pigs from combined room and pit ventilation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2016. Vol. 218. P. 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.020>
13. Mostafa E., Holscher R., Diekmann B., Gali A. E., Buescher W. Evaluation of two methods for reducing indoor air pollution in forced-ventilated pig houses in the fattening area. *Atmos. Pollut. Res.* 2017. Vol. 8. P. 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.11.003>
14. Yeo W.-H., Lee I.-B., Kim R.-W., Lee S.-Y., Kim J.-G. Computational evaluation of hydrodynamics of pig house ventilation systems to improve the indoor growing environment. *Biosyst. Eng.* 2019. Vol. 186. P. 259–278. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.08.007>
15. Saha K. K., Zhang G., Cai P., Bjerg B. Effects of partial septic tank ventilation system on indoor air quality and ammonia emissions from a pig fattening house. *Biosyst. Eng.* 2010. Vol. 105. P. 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.11.006>
16. Guo L., Zhao B., Jia Y., He F., Chen W. Strategies for reducing air pollution in mechanically ventilated livestock and poultry houses – a review. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. Iss. 3. Article 452. <https://doi.org/10.3390/atmos13030452>
17. Park J., Seok J., Lee S., Kwon O., Lee K., Heo Y., Yoon Ch. Ammonia and Hydrogen Sulfide Monitoring in Broiler Barns and Cattle Barns. *J Environ Health Sci.* 2015. Vol. 41. Iss. 5. P. 277–288. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2015.41.5.277>
18. Hydrogen Sulfide in Workplace Atmospheres: Method Number ID-141 / Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor, Washington D.C. 2010. URL: <https://dnacih.com/niosh/nioshdbos/oshameth/id141/id141.html> (дата звернення: 25.04.2025).
19. Hydrogen Sulfide / Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor, Washington D.C. URL: <https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide/hazards> (дата звернення: 25.04.2025).
20. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards: Hydrogen Sulfide. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, Ohio. September 2005. URL: <http://www.cdc.gov/Niosh/npg/npgd0337.html> (дата звернення: 30.04.2025).
21. Lim T.-T., Heber A. J., Ni J.-Q. Air quality measurements at a laying hen house: odor and hydrogen sulfide emissions. *International Symposium on Control of Gaseous and Odor Emissions from Animal Production Facilities, Horsens, Denmark* / Danish Institute of Agricultural Sciences, Foulum, Denmark, 2003. P. 273–282.
22. Zhu J., Jacobson L., Schmidt D., Nicolai R. Daily variations in odor and gas emissions from animal facilities. *Applied Engineering in Agriculture*. 2000. Vol. 16. P. 153–158. <https://doi.org/10.13031/2013.5067>
23. Kafle G. K., Chen L. Emissions of Odor, Ammonia, Hydrogen Sulfide, and Volatile Organic Compounds from Shallow-Pit Pig Nursery Rooms. *J. of Biosystems Eng.* 2014. Vol. 39. Iss. 2. P. 76–86. <http://dx.doi.org/10.5307/JBE.2014.39.2.076>
24. Guarrasi J., Trask C., Kirychuk Sh. A Systematic Review of Occupational Exposure to Hydrogen Sulfide in Livestock Operations. *J. Agromedicine*. 2015. Vol. 20. Iss. 2. P. 225–236. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2015.1009667>
25. Ni J. Q., Diehl C. A., Heber A. J. et al. Emission of pollutants from multi-storey poultry houses with two-year continuous monitoring. *Proceedings of the International Symposium on Gas and Dust Emissions from Livestock (EMILI 2012)* (10–13 June 2012 in Saint-Malo, France) / IFIP – Institut Technique du Porc. 2013. P. 73–77.
26. Ni J. Q., Heber A. J., Diehl C. A., Lim T. L. SE-Structures and Environment: Ammonia, hydrogen sulphide and carbon dioxide release from pig manure in under-floor deep pits. *J. Agric. Eng. Res.* 2000. Vol. 77. Iss. 1. P. 53–66. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0561>
27. Бащенко М.І., Волощук В.М., Іванов В.О. та ін. Методика мультипараметричної оцінки мікроклімату тваринницьких приміщень методом безперервної автоматичної реєстрації: метод. рек. / Черкаська ДСБ НААН. Черкаси, 2021. 24 с. URL: <https://bioresurs.ck.ua/publications/> (дата звернення: 30.04.2025).
28. Бойко О. В., Небилиця М. С., Демиденко О. В. та ін. Методика визначення показників емісії парникових газів та деяких забруднювальних речовин від сільськогосподарських об'єктів і агроландшафтів методом безперервної автоматичної реєстрації: метод. рек. / Черкаська ДСБ НААН. Черкаси, 2024. 44 с. URL:

<https://bioresurs.ck.ua/o-бойко-м-небилиця-о-деמידенко-о-гаври/> (дата звернення 30.11.2025).

29. Небилиця М. С., Бойко О. В. Мультипараметрична оцінка мікроклімату тваринницьких приміщень методом безперервної автоматичної реєстрації. *Свинарство: міжвідом. темат. наук. зб.* Полтава: ТОВ «Фірма-«Техсервіс», 2022. Вип. 77–78. С. 106–116. <https://doi.org/10.37143/0371-4365-2022-77-78-09>

30. Bogan B. W., Heber A. J. Air pollution emissions from dairy farms: a literature review. *Proceedings of the International Symposium on Gas and Dust Emissions from Livestock (EMILI 2012)* 10–13 June 2012 in Saint-Malo, France/IFIP, 2013. P. 18–21. URL: https://www.rmtelevagesenvironnement.org/backoffice/uploads/Symposium_Emili2012.pdf (дата звернення: 30.11.2025)

31. Bogan B. W. et al. National Air Emissions Monitoring Study: Dairy Industry Data. Freestall Premises and Milking Center in New York State. – NY5B Site. Final Report. Purdue University, Lafayette, IN./ Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards 109 T.W. Alexander Drive Research Triangle Park, N.C. 27709 June 2022, P. 13–14. URL: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/historical-dairy_preliminarydraft_report.pdf (дата звернення: 30.11.2025).

32. Lim T. T., et al. National Air Emission Monitoring Study: Emission Data from Two Freestalls and a Milking Parlor on a Dairy Farm in Indiana State – Site IN5B. Purdue University, Lafayette, IN 2010./ Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards 109 T.W. Alexander Drive Research Triangle Park, N.C. 27709 June 2022, P. 12–13. URL: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/historical-dairy_preliminarydraft_report.pdf (дата звернення: 30.11.2025).

33. Cortus et al. National Air Emissions Monitoring Study: Data from Two Freestall Dairy Facilities in the state of Wisconsin – Site WI5B, Final Report. Purdue University, Lafayette, Vi, 2010 / Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards 109 T.W. Alexander Drive Research Triangle Park, N.C. 27709 June 2022, P. 16. URL: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/historical-dairy_preliminarydraft_report.pdf (дата звернення: 30.11.2025).

34. Ramirez J. C. et al. National Air Emissions Monitoring Study: Data from Two Freestall Dairy Facilities in Washington State WA5B, Final Report. Purdue University, Lafayette, Va, 2010 / Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards 109 T.W. Alexander Drive Research Triangle Park, N.C. 27709 June 2022, P. 14-15. URL: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/historical-dairy_preliminarydraft_report.pdf (дата звернення: 30.11.2025).

35. Bottenheim J. W., Strauss O. P. Gas-phase chemistry of clean air at 55 degrees north latitude. *Environ Sci Technol.* 1980. Vol. 14. Iss. 6. P. 709–718. <https://doi.org/10.1021/es60166a010>

36. Fuller D. K., Suruda A. J. Occupationally-related hydrogen sulfide deaths in the United States from 1984 to 1994. *J. Occup Environ Med.* 2000. Vol. 42. P. 939–942. URL: https://journals.lww.com/joem/fulltext/2000/09000/occupationally_related_hydrogen_sulfide_deaths_in.19.aspx (дата звернення: 25.04.2025).

37. Moretti M., Ballardini M., Ciodambro S., Tronconi L., Osculati A., Freni F., Vignali S., Morini L. Fatal poisoning of four farm workers: distribution of hydrogen sulfide and thiosulfate in 10 different biological matrices. *Forensic Sci. International.* 2020. Vol. 316. Article 110525. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110525>

38. Masure R. La Keratoconjunctivite des filatures de viscose; etude clinique and experiementale. *Rev Belge Pathol.* 1950. Vol. 20. P. 297–341.

39. Nordstrom G. A. A study of the response of calves to ammonia and hydrogen sulfide. Dissertation, University of Alberta, Department of Agricultural Engineering, Edmonton, Alberta; 1975, 218 p. *Internet Archive.* URL: <https://archive.org/details/Nordstrom1975/page/n9/mode/2up> (дата звернення: 25.04.2025).

40. Michal F. V. Eye lesions caused by hydrogen sulfide. *Cesk Ophthalmol.* 1950. Vol. 6. P. 5–8.

41. Morphological observations on rats exposed to an atmosphere containing 0.56 or 420 mg/m³ hydrogen sulfide for six hours. AECV86-A1 /Alberta Ecology Centre, Vegreville,

Alberta; 1986. 28 p. *Internet Archive*. URL: <https://archive.org/details/morphologicalobs00albe> (дата звернення: 25.04.2025).

42. Kosmider S., Rogala E., Pacholek A. Electrocardiographic and histochemical studies of the heart muscle in acute experimental hydrogen sulfide poisoning. *Arch Immunol Ther Exp*. 1967. Vol. 15. P. 731–740. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4174426/> (дата звернення: 29.04.2025).

43. Dorman D. C., Struve M. F., Gross E. A., Breneman K. A. Respiratory toxicity of hydrogen sulfide inhalation in Fischer-344, Sprague-Dawley rats, and B₆C₃F₁ mice after subchronic (90-day) exposure. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2004. Vol. 198. Iss. 1. P. 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2004.03.010>

44. Elovaara E., Tossavainen A., Savolainen H. Effects of subclinical hydrogen sulfide intoxication on mouse brain protein metabolism. *Exp Neurol*. 1978. Vol. 62. P. 93–98. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(78\)90043-2](https://doi.org/10.1016/0014-4886(78)90043-2)

45. Savolainen H., Tenhunen R., Elovaara E., Tossavainen A. Cumulative biochemical effects of repeated subclinical hydrogen sulfide intoxication in mouse brain. *Int Arch Occup Environ Health*. 1980. Vol. 46. P. 87–92. <https://doi.org/10.1007/BF00377463>

46. Higuchi Y., Fukamachi M. Behavioral studies on toxicity of hydrogen sulfide by means of conditioned avoidance responses in rats. *Japanese J. of Pharmacology*. 1977. Vol. 73. № 3. P. 307–319 [Japanese]. <https://doi.org/10.1254/fpj.73.307>

47. Prior M. G., Sharma A. K., Yong S., Lopez A. Concentration-time interactions in hydrogen sulphide toxicity in rats. *Can. J. Vet. Res*. 1988. Vol. 52. P. 375–379. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1255467/> (дата звернення: 29.04.2025).

48. Tansy M. F., Kendall F. M., Fantasia J., Landin W. E., Oberly R., Sherman W. Acute and subchronic toxicity studies of rats exposed to vapors of methyl mercaptan and other reduced-sulfur compounds. *J Toxicol Environ Health*. 1981. Vol. 8. Iss. 1–2. P. 71–88. <https://doi.org/10.1080/15287398109530051>

49. Prior M., Green F., Lopez A., Balu A., DeSanctis G. T., Fick G. Capsaicin pretreatment modifies hydrogen sulphide-induced pulmonary injury in rats. *Toxicol Pathol*. 1990. Vol. 18. P. 279–288. <https://doi.org/10.1177/019262339001800206>

50. Khan A. A., Schuler M. M., Prior M. G., Yong S., Coppock R. W., Florence L. Z., Lilly L. E. Effects of hydrogen sulfide exposure on lung mitochondrial respiratory chain enzymes in rats. *Toxicol Appl Pharmacol*. 1990. Vol. 103. P. 482–490. [https://doi.org/10.1016/0041-008x\(90\)90321-k](https://doi.org/10.1016/0041-008x(90)90321-k)

51. Lopez A., Prior M., Yong S., Albassam M., Lillie L. E. Biochemical and cytological alterations in the respiratory tract of rats exposed for 4 hours to hydrogen sulfide. *Fundam Appl Toxicol*. 1987. Vol. 9. P. 753–762. [https://doi.org/10.1016/0272-0590\(87\)90182-5](https://doi.org/10.1016/0272-0590(87)90182-5)

52. Lopez A., Prior M., Lillie L. E., Gulayets C., Atwa, O. S. Histologic and ultrastructural alterations in lungs of rats exposed to sub-lethal concentrations of hydrogen sulfide. *Vet Pathol*. 1988. Vol. 25. P. 376–384. <https://doi.org/10.1177/030098588802500507>

53. Lopez A., Prior M., Yong S., Lillie L., Lefebvre M. Nasal lesions in rats exposed to hydrogen sulfide for four hours. *Am J Vet Res*. 1988. Vol. 49. P. 1107–1111. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3421534/> (дата звернення: 29.04.2025).

54. Beck J. F., Cormier F., Donini J. C. The combined toxicity of ethanol and hydrogen sulfide. *Toxicol Lett*. 1979. Vol. 3. Iss. 5. P. 311–313. [https://doi.org/10.1016/0378-4274\(79\)90009-2](https://doi.org/10.1016/0378-4274(79)90009-2)

55. Kage S., Nagata T., Kimura K., Kudo K., Imamura T. Usefulness of thiosulfate as an indicator of hydrogen sulfide poisoning in forensic toxicological examination: A study with animal experiments. *Jpn J Forensic Toxicol*. 1992. Vol. 10. P. 223–227.

56. Smith R.P., Gosselin R.E. The influence of methemoglobinemia on the lethality of some toxic anions: II. Sulfide. *Toxicol Appl Pharmacol*. 1964. Vol. 6. P. 584–592. [https://doi.org/10.1016/0041-008x\(64\)90090-0](https://doi.org/10.1016/0041-008x(64)90090-0)

57. Lopez A., Prior M. G., Reiffenstein R. J., Goodwin L. R. Peracute toxic effects of inhaled hydrogen sulfide and injected sodium hydrosulfide on the lungs of rats. *Fundam Appl Toxicol*. 1989. Vol. 12. P. 367–373. [https://doi.org/10.1016/0272-0590\(89\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0272-0590(89)90053-5)

58. Toxicological Profile of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide / ATSDR U.S. Department of Health and Human Services, Division of Toxicology and Environmental Medicine, Division of Applied Toxicology, editor. ATSDR. Atlanta, GA: 2016. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK591605/> (дата звернення: 29.04.2025).

59. Свинарські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми): ВНТП-АПК-01.05 [Чинні з 01.01.2006] / Мінагрополітики України, Київ 2005. 98 с. URL: https://lugdpss.gov.ua/images/bezpechnist_veterynariya/Svynarski-pidpryemstva-VNTP-APK-02.05.pdf (дата звернення: 29.04.2025).
60. Скотарські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми): ВНТП-АПК-02.05 [Чинні з 01.01.2006] / Мінагрополітики України, Київ 2005. 111 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/vntp/14-1-0-1039> (дата звернення: 29.04.2025).
61. Підприємства зрівнювання та кролівництва: ВНТП-АПК-05.07 [Чинні з 11.03.2008] / Мінагрополітики України, Київ 2007. 65 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67808 (дата звернення: 29.04.2025).
62. Schiffman S. S., Auvermann B. W., Bottcher R. W. Health effects of aerial emissions from animal production waste management systems. National Center for Manure and Animal Waste Management White Papers /North Carolina State University, Raleigh, NC, 2002. 45 p. URL: <https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=1&AID=23886&CID=aqwm2007&T=1> (дата звернення: 29.04.2025).
63. Saeedi A., Najibi A., Mohammadi-Bardbori A. Effects of long-term exposure to hydrogen sulfide on human erythrocytes. *Intern. J. of Occupation and Environmental Health*. 2015. Vol. 6. Iss. 1. P. 20–25. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25588222/> (дата звернення: 29.04.2025).
64. Guidotti Tee L. Hydrogen Sulfide: Advances in Understanding Human Toxicity. *Intern J of Toxicology*. 2010. Vol. 29. Iss. 6. P. 569–581. <https://doi.org/10.1177/1091581810384882>
65. Helmy N., Pripp-Buus K., Vons C., Lenoir V., Abou-Hamdan A., Guedouari-Bounihi H., Lombès A., Bouillaud F. Oxidation of hydrogen sulfide by human liver mitochondria. *Nitric Oxide*. 2014. Vol. 41. P. 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2014.05.011>
66. Aneja V. P., Blunden J., Roelle P. A., Schlesinger W. H., Knighton R., Niyogi D. Workshop on agricultural air quality: state of the science. *Atmospheric Environment*. 2008. Vol. 42. Iss. 14. P. 3195–3208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.043>
67. Kilburn K. H. Human impairment from living near confined animal (hog) feeding operations. *J. Environ Public Health*. 2012. Vol. 2012. Article 565690. <https://doi.org/10.1155/2012/565690>
68. Report to Congress on Hydrogen Sulfide Air Emissions Associated with the Extraction of Oil and Natural Gas / Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. 1993. 222 p EPA-453/R-93-045. URL: <https://www.osti.gov/biblio/5394599> (дата звернення: 25.04.2025).
69. Environmental health criteria: Hydrogen sulfide. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 1981. URL: <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc019.htm> (дата звернення: 25.04.2025).
70. Hill F. B. Atmospheric sulfur and its links to the biota. *Brookhaven Symp Biol*. 1973. Vol. 30. P. 159–181.
71. Cox, R., Sheppard, D. Reactions of OH radicals with gaseous sulfur compounds. *Nature* 1980. Vol. 284, P 330–331. <https://doi.org/10.1038/284330a0>
72. Millero F. J., Hubinger S., Fernandez M., Garnett S. Oxidation of H₂S in sea water as a function of temperature, pH and ionic strength. *Environ Sci Technol*. 1987. Vol. 21. Iss. 5. P. 439–443. <https://doi.org/10.1021/es00159a003>
73. Millero F. J., LeFerriere A., Fernandez M., Hubinger S., Hershey J. P. Oxidation of hydrogen sulfide with H₂O₂ in natural waters. *Environ Sci Technol*. 1989. Vol. 23. Iss. 2. P. 209–213. <https://doi.org/10.1021/es00179a012>
74. Hydrogen sulfide. The Merck index: An encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals / O'Neil M. J., Heckelman P. E., Koch Ch. B., Roman K. J. (eds.). Whitehouse Station, NJ: Merck & Co., Inc., 2001. 859 p.
75. Torrance E. L., Clemens G. P. Physiological and biochemical effects of acute exposure to hydrogen sulfide in fish. *Comp Biochem Physiol* 1. 1982. Vol. 71. Iss. 2. P. 183–190. [https://doi.org/10.1016/0306-4492\(82\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0306-4492(82)90034-X)

76. Bagarinao T., Vetter R. D. Sulfide-hemoglobin interactions in the sulfide-tolerant salt marsh California killifish *Fundulus parvipinnis*. *J. of Comparative Physiology B*. 1992. Vol. 162. P. 614–24. <https://doi.org/10.1007/BF00296642>
77. Fryer J. M. Soil Properties That Influence the Occurrence of Hydrogen Sulfide Toxicity in Rice Fields: Graduate Theses and Dissertations Retrieved from. 2018. URL: <https://scholarworks.uark.edu/etd/2640> (дата звернення: 24.04.2025).
78. Li P., Li M., Liu Zh., Zhao Y., Qian X., Huang P. Effect of high temperature and sulfur vapor on the flammability limit of hydrogen sulfide. *J. Of Cleaner Production*. 2022. Vol. 337. Article 130579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130579>
79. Chen B., Kozel J. A., Li M., O'Brien S. K., Li P., Brown R. K. Reduction of acute hydrogen sulfide and ammonia emissions from pig manure during three-hour mixing using granular biochar. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12. Iss. 7. Article 825. <https://doi.org/10.3390/atmos12070825>
80. Wi J., Lee Sh., Kim A., Kim A., Lee M., Kozel J. A., Ahn H. Evaluation of the effectiveness of a semi-continuous manure pit replenishment system in reducing ammonia and hydrogen sulfide emissions from a pig fattening barn. *Atmosphere*. 2019. Vol. 10. Iss. 4. Article 170. <https://doi.org/10.3390/atmos10040170>
81. Воробель М. І., Каплінський В. В., Клим О. Я., Дмитроца А. І., Телушко Г. Я. Ефективність впливу різних доз біопрепарату Капельюхів Яроч на рівень виділення шкідливих газів з курячого посліду. *Вісник аграрної науки*. 2022. № 2. С. 67–73. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202202-09>
82. Lim T. T., Heber A. J., Ni J.-Q., Sutton A. L., Shao P. Atmospheric pollutants and trace gases: Odor and gas release from anaerobic treatment lagoons for swine manure. *J Environ Qual*. 2003. Vol. 32. Iss. 2. P.406–416. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.4060>
83. Zahn J. A., Hatfield J. L., Laird D. A., Hart T. T., Do Y. S., DiSpirito A. A. Functional classification of swine manure management systems based on effluent and gas emission characteristics. *J. of Environmental Quality*. 2001. Vol. 30. Iss. 2. P. 635–647. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.302635x>
84. Білецький В. С., Орловський В. М. Біогаз. *Велика українська енциклопедія*. URL: <https://vue.gov.ua/Біогаз> (дата звернення: 29.04.2025).
85. Санжара Р. А., Лесновська О. В. Технологія переробки відходів сільськогосподарського виробництва. Дніпро, 2024. 144 с. URL: <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/11992> (дата звернення: 25.04.2025).
86. Голуб Г. А., Дубровін В. О., Поліщук В. М., Сєра К. М., Марус А. О., Драгнєв С. В., Сидорчук О. В., Павленко М. Ю., Чуба В. В., Кухарець С. М., Щербак С. Д. Біогаз / Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ, 2015. 48 с. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/5144/1/Biogaz_TM7.pdf (дата звернення: 29.04.2025).
87. Біоенергетика в Україні. *Офіц. сайт UABIO*. URL: <https://uabio.org/bioenergy-in-ukraine/> (дата звернення: 22.09.2025).
88. Biogas desulfurization. *Website Knowledge Ridge*. URL: <https://www.knowledgeridge.com/expert-views/biogas-desulfurization> (дата звернення: 09.06.2024).
89. Dumont E. H₂S removal from biogas using bioreactors: a review.. *Intern. J. Of Energy and Environment (IJEE)*. 2015. Vol. 6. Iss. 5. P. 479–498. URL: <http://www.ijee.ieefoundation.org/> (дата звернення: 22.04.2025).
90. Chemical Products Industries Inc. Hydrogen sulfide removal from natural gas and biogas. *Site Chemical Products Industries, Inc.* URL: <https://www.chemicalproductsokc.com/sulfurtrap-h2s-removal-gas/> (date of access: 30.09.2025).
91. Yadav A., Kale S. Hydrogen Sulfide Control via Biotrickling Filters. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2021. Vol. 23. Iss. 3. P. 457–468. URL: <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01972-3>
92. Guo L., Zhao B., Jia Y., He F., Chen W. Strategies for reducing air pollution in mechanically ventilated livestock and poultry houses - a review. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13. Iss. 3. Article 452. <https://doi.org/10.3390/atmos13030452>
93. Ni J.-Q. Factors affecting toxic hydrogen sulfide concentrations on swine farms - Sulfur source, release mechanism, and ventilation. *J. Clean. Prod.* 2021. Vol.322. P. 129–126. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621033151> (дата звернення: 22.04.2025).

94. Kafle G. K., Chen L., Naibling H., He B. B. Field evaluation of downflow wood bark-based biofilters for reducing odor, ammonia, and hydrogen sulfide emissions from closed pig houses. *J. Environ. Manag.* 2015. Vol. 147. P. 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.004>
95. Dumont E., Cabral F. D. S., Le C. P., Andrés Y. Biofiltration using peat and nutrient synthetic packing material: influence of packing configuration on H₂S removal. *Environ. Technol.* 2013. Vol. 34. P. 1123–1129. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.736691>
96. Nour M. M., Cheng Y.-H., Ni J.-Q., Sheldon E., Field W. E. Summary of injuries 139 and fatalities involving livestock manure storage, handling, and transport operation sin seven 140 central states: 1976–2019. *J. Agric. Saf. Health.* 2021. Vol. 27. Iss. 2. P. 105–122. <http://doi.org/10.13031/jash.14343>
97. Oesterhelweg L., Püschel K. Death may come on like a stroke of lightning. Phenomenological and morphological aspects of fatalities caused by manure gas. *Int. J. Legal. Med.* 2008. Vol. 122. Iss. 2. P. 101–107. <http://doi.org/10.1007/s00414-007-0172-8>
98. Liu Sh., Ni J.-K., Radcliffe J. S., Vonderohe C. Hydrogen sulfide emissions from a pig farm affected by crude protein in the diet. *J. Of Environmental Management.* 2017. Vol. 204. Part 1. P. 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.031>

REFERENCES

1. Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini u 2021 rotsi. [National report on the state of the environment in Ukraine in 2021.] / Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy [in Ukrainian]. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (date of access: 25.04.2025).
2. Sirkovoden. *Hydrogen Sulfide* [in Ukrainian]. Retrieved from <https://empendium.com/ua/manual/chapter/B72.XIII.C.14> (date of access: 25.04.2025).
3. USEPA. (2001). Emissions from animal feeding operations, In U.S. Environmental Protection Agency Emission Standards Division Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, NC 27711, August 15, 2001. P. 32–33. Retrieved from <https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/draftanimalfeed.pdf> (date of access: 25.04.2025).
4. Arogo, J., Zhang, R. H., Riskowski, G. L., & Day, D. L. (2000). Laboratory study (Vol. 43). St. Joseph, MI, ETATS-UNIS: American Society of Agricultural Engineers.
5. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine (2006). Systemy vydalennia, obrobky, pidhotovky ta vykorystannia hnoiu: VNTP-APK-09.06 [5. Systems for removing, treating, preparing, and using manure] [in Ukrainian]. Retrieved from <https://agro.vobu.ua/wp-content/uploads/2021/11/VNTP-APK-09.06.pdf> (date of access: 29.04. 2025).
6. Lim, T.-T., Heber, A. J., Ni, J.-Q., Kendall, D., & Richert, B. T. (2004). Effects of manure removal strategies on odor and gas emission from swine finishing. *Transactions of the ASAE*, 47(6), 2041–2050. <https://doi.org/10.13031/2013.17801>
7. Hoff, S. J., Bundy, D. S., Nelson, M. A., Zelle, B. C., Jacobson, L. D., Heber, A. J., Ni, J.-Q. ... & Beasley, D.B. (2006). Emissions of ammonia, hydrogen sulfide, and odor before, during and after slurry removal from a deep-pit swine finisher. *J. of the Air & Waste Management Association*, 56, 581–590. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464472>
8. Aneja, V. P., Blunden, J., Roelle, P. A., Schlesinger, W. H., Knighton, R., Niyogi, D. ...& Duke C. S. (2008). Workshop on agricultural air quality: state of the science. *Atmospheric Environment*, 42(14), 3195–3208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.043>
9. Atia, A., Haugen-Kozyra, K., & Amrani, M. (2004). Ammonia and hydrogen sulfide emissions from livestock production. Alberta: Agriculture, Food and Rural Development, 229–272. Retrieved from [https://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/epw8313/\\$file/chapter7.pdf](https://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/epw8313/$file/chapter7.pdf) (date of access: 25.04.2025).
10. Maasikmets, M., Teinemaa, E., Kaasik, A., & Kimmel, V. (2015). Measurement and analysis of ammonia, hydrogen sulphide and odour emissions from the cattle farming in Estonia. *Biosystems Engineering*, 139, 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.08.002>
11. Blanes-Vidal, V., Guàrdia, M., Dai, X. R., & Nadimi, E. S. (2012). NH₃, CO₂ and H₂S emissions during swine wastewater management: characterization of transient emissions

after air-liquid interface disturbances. *Atmos. Environ.*, 54, 408–418. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.046>

12. Van Huffell, K., Hansen, M. J., Feilberg, A., Liu, D., & Van Langenhove, H. (2016). Level and distribution of odorous compounds in exhaust air of pigs from combined room and pit ventilation. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 218, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.020>

13. Mostafa, E., Holscher, R., Diekmann, B., Gali, A. E., & Buescher, W. (2017). Evaluation of two methods for reducing indoor air pollution in forced-ventilated pig houses in the fattening area. *Atmos. Pollut. Res.*, 8, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.11.003>

14. Yeo, W.-H., Lee, I.-B., Kim, R.-W., Lee, S.-Y., & Kim, J.-G. (2019). Computational evaluation of hydrodynamics of pig house ventilation systems to improve the indoor growing environment. *Biosystems Engineering*, 186, 259–278. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.08.007>

15. Saha, K. K., Zhang, G., Cai, P. & Bjerg, B. (2010). Effects of partial septic tank ventilation system on indoor air quality and ammonia emissions from a pig fattening house. *Biosyst. Eng.*, 105, 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.11.006>

16. Guo L., Zhao B., Jia Y., He F., Chen W. (2022). Strategies for reducing air pollution in mechanically ventilated livestock and poultry houses – a review. *Atmosphere.*, 13(3), 452. <https://doi.org/10.3390/atmos13030452>

17. Park, J., Seok, J., Lee, S., Kwon, O., Lee, K., Heo, Y., & Yoon, Ch. (2015). Ammonia and Hydrogen Sulfide Monitoring in Broiler Barns and Cattle Barns. *J Environ Health Sci.*, 41(5), 277–288. <http://dx.doi.org/10.5668/JEHS.2015.41.5.277>

18. Hydrogen Sulfide in Workplace Atmospheres: Method Number ID-141 / Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor, Washington D.C. 2010. URL: <https://dnacih.com/niosh/nioshdbos/oshmeth/id141/id141.html> (date of access: 25.04.2025).

19. OSHA (2005). Hydrogen Sulfide in Workplace Atmospheres: Method Number ID-141. Occupational Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor, Washington D.C. Retrieved from <https://www.osha.gov/hydrogen-sulfide/hazards> (date of access: 25.04.2025).

20. National Institute for Occupational Safety and Health. (2005). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards: Hydrogen Sulfide. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, Ohio. September 2005. Retrieved from <http://www.cdc.gov/Niosh/npg/npgd0337.html> (date of access: 30.04.2025).

21. Lim, T.-T., Heber, A. J., & Ni, J.-Q. (2003). Air quality measurements at a laying hen house: odor and hydrogen sulfide emissions. In: International Symposium on Control of Gaseous and Odor Emissions from Animal Production Facilities, Horsens, Denmark. Danish Institute of Agricultural Sciences, Foulum, Denmark, 273–282.

22. Zhu, J., Jacobson, L., Schmidt, D., & Nicolai, R. (2000). Daily variations in odor and gas emissions from animal facilities. *Applied Engineering in Agriculture* 16, 153–158. <https://doi.org/10.13031/2013.5067>

23. Kafle, G. K., & Chen, L. (2014). Emissions of Odor, Ammonia, Hydrogen Sulfide, and Volatile Organic Compounds from Shallow-Pit Pig Nursery Rooms. *J. of Biosystems Eng.*, 39(2), 76–86. <http://dx.doi.org/10.5307/JBE.2014.39.2.076>

24. Guarrasi, J., Trask, C., & Kirychuk, Sh. (2015). A Systematic Review of Occupational Exposure to Hydrogen Sulfide in Livestock Operations. *J of Agromedicine*, 20(2), 225–236. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2015.1009667>

25. Ni, J. Q., Diehl, C. A., Heber, A. J. et al. (2013). Emission of pollutants from multi-storey poultry houses with two-year continuous monitoring. Proceedings of the International Symposium on Gas and Dust Emissions from Livestock (EMILI 2012) 10-13 June 2012 in Saint-Malo, France. IFIP – Institut Technique du Porc, 73–77.

26. Ni, J. Q., Heber, A. J., Diehl, C. A., & Lim, T. L. (2000). Ammonia, hydrogen sulphide and carbon dioxide release from pig manure in under-floor deep pits. *J. Agric. Eng. Res.*, 77(1), 53–66. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0561>

27. Bashchenko, M. I., Voloshchuk, V. M., Ivanov, V. O. et al. (2021). Metodyka multy-parametrychnoi otsinky mikroklimatu tvarynytskykh prymishchen metodom bezpererivnoi avtomatychnoi reiestratsii [Methodology of multi-parametric estimation of microclimate of livestock settlements by continuous automatic registration method] / Research Station of Bioresources of the NAAS [in Ukrainian]. Retrieved from <https://bioresurs.ck.ua/publications/> (date of access: 30.04.2025).

28. Boiko, O. V., Nebylytsia, M. S., Demydenko, O. V. et al. (2024). *Metodyka vyznachennia pokaznykiv emisii parnykovykh haziv ta deiakykh zabrudniuvalnykh rehovyn vid silskohospodarskykh ob'ektiv i ahrolandshaftiv metodom bezperervnoi avtomatychnoi reiestratsii*. [Methodology for determining indicators of greenhouse gas emissions and some pollutants from agricultural facilities and agricultural landscapes by the method of continuous automatic registration] [in Ukrainian]. Retrieved from <https://bioresurs.ck.ua/o-бойко-м-небилиця-о-демиденко-о-гаври/> (date of access: 30.11.2025).
29. Nebylytsia, M. S., & Boiko, O. V. (2022). *Multiparametrychna otsinka mikroklimatu tvarynnytskykh prymishchen metodom bezperervnoi avtomatychnoi reiestratsii*. [Multiparametric assessment of the microclimate of livestock premises using the method of continuous automatic registration]. *Svynarstvo* [Pig farming]. Poltava, TOV «Firma-«Tekhservis», 77–78, 106–116 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37143/0371-4365-2022-77-78-09>
30. Bogan, B. W., & Heber, A. J. (2013). Air pollution emissions from dairy farms: a literature review. *Proceedings of the International Symposium on Gas and Dust Emissions from Livestock* (EMILI 2012) 10-13 June 2012 in Saint-Malo, France. IFIP – Institut Technique du Porc, 18–21. Retrieved from https://www.rmtelevagesenvironnement.org/backoffice/uploads/Symposium_Emili2012.pdf (date of access: 30.11.2025).
31. Bogan, B. W. et al. (2022). *National Air Emissions Monitoring Study: Dairy Industry Data. Freestall Premises and Milking Center in New York State. – NY5B Site. Final Report*. Purdue University, Lafayette, IN / Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards 109 T.W. Alexander Drive Research Triangle Park, N.C. 27709., 13–14. Retrieved from https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/historical-dairy_preliminarydraft_report.pdf (date of access: 30.11.2025).
32. Lim, T. T. et al. (2022). *National Air Emission Monitoring Study: Emission Data from Two Freestalls and a Milking Parlor on a Dairy Farm in Indiana State – Site IN5B*. Purdue University, Lafayette, IN 2010 / Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards 109 T.W. Alexander Drive Research Triangle Park, N.C. 27709, 12–13. Retrieved from https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/historical-dairy_preliminarydraft_report.pdf (date of access: 30.11.2025).
33. Cortus et al. (2022). *National Air Emissions Monitoring Study: Data from Two Freestall Dairy Facilities in the state of Wisconsin – Site WI5B, Final Report*. Purdue University, Lafayette, Vi, 2010 / Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards 109 T.W. Alexander Drive Research Triangle Park, N.C. 27709, 16. Retrieved from https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/historical-dairy_preliminarydraft_report.pdf (date of access: 30.04.2025).
34. Ramirez J.C. et al. (2022). *National Air Emissions Monitoring Study: Data from Two Freestall Dairy Facilities in Washington State WA5B, Final Report*. Purdue University, Lafayette, Va, 2010 / Prepared by: U.S. Environmental Protection Agency Office of Air and Radiation Office of Air Quality Planning and Standards 109 T.W. Alexander Drive Research Triangle Park, N.C. 27709, 14–15. Retrieved from https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-11/historical-dairy_preliminarydraft_report.pdf (date of access: 30.11.2025).
35. Bottenheim, J. W., & Strauss, O. P. (1980). Gas-phase chemistry of clean air at 55 degrees north latitude. *Environ Sci Technol.*, 14, 709–718. <https://doi.org/10.1021/es60166a010>
36. Fuller, D. K., & Suruda, A. J. (2000). Occupationally-related hydrogen sulfide deaths in the United States from 1984 to 1994. *J Occup Environ Med.*, 42, 939–942. Retrieved from https://journals.lww.com/joem/fulltext/2000/09000/occupationally_related_hydrogen_sulfide_deaths_in.19.aspx (date of access; 25.04.2025).
37. Moretti, M., Ballardini, M., Ciodambro, S., Tronconi, L., Osculati, A., Freni, F., Vignali, S., & Morini, L. (2020). Fatal poisoning of four farm workers: distribution of hydrogen sulfide and thiosulfate in 10 different biological matrices. *Forensic Sci International*, 316, 110525. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110525>
38. Masure, R. (1950). La Keratoconjunctivite des filatures de viscose; etude clinique and experimentale. *Rev Belge Pathol.*, 20, 297–341.
39. Nordstrom, G. A. (1975). A study of the response of calves to ammonia and hydrogen sulfide. Dissertation, University of Alberta, Department of Agricultural Engineering,

Edmonton, Alberta. *Internet Archive*. Retrieved from <https://archive.org/details/Nordstrom1975/page/n9/mode/2up> (date of access: 25.04.2025).

40. Michal, F. V. (1950). Eye lesions caused by hydrogen sulfide. *Cesk Ophthalmol*, 6, 5–8.

41. Alberta Ecology Centre (1986). Morphological observations on rats exposed to an atmosphere containing 0.56 or 420 mg/m³ hydrogen sulfide for six hours. AECV86-A1, Alberta. Retrieved from <https://archive.org/details/morphologicalobs00albe> (date of access: 25.04.2025).

42. Kosmider, S., Rogala, E., & Pacholek, A. (1967). Electrocardiographic and histochemical studies of the heart muscle in acute experimental hydrogen sulfide poisoning. *Arch Immunol Ther Exp.*, 15, 731–740. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4174426/> (date of access: 25.04.2025).

43. Dorman, D. C., Struve, M. F., Gross, E. A., Brenneman, K. A. (2004). Respiratory toxicity of hydrogen sulfide inhalation in Fischer-344, Sprague-Dawley rats, and B₆C₃F₁ mice after subchronic (90-day) exposure. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 198(1), 29–39. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2004.03.010>

44. Elovaara, E., Tossavainen, A., & Savolainen, H. (1978). Effects of subclinical hydrogen sulfide intoxication on mouse brain protein metabolism. *Exp Neurol*, 62, 93–98. [https://doi.org/10.1016/0014-4886\(78\)90043-2](https://doi.org/10.1016/0014-4886(78)90043-2)

45. Savolainen, H., Tenhunen, R., Elovaara, E., & Tossavainen, A. (1980). Cumulative biochemical effects of repeated subclinical hydrogen sulfide intoxication in mouse brain. *Int Arch Occup Environ Health*, 46, 87–92. <https://doi.org/10.1007/bf00377463>

46. Higuchi, Y., & Fukamachi, M. (1977). Behavioral studies on toxicity of hydrogen sulfide by means of conditioned avoidance responses in rats. *Folia Pharmacol Jap*, 73, 307–319 [Japanese]. <https://doi.org/10.1254/fpj.73.307>

47. Prior, M. G., Sharma, A. K., Yong, S., & Lopez, A. (1988). Concentration-time interactions in hydrogen sulphide toxicity in rats. *Can J Vet Res.*, 52, 375–379. Retrieved from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1255467/> (date of access: 25.04.2025).

48. Tansy, M. F., Kendall, F. M., Fantasia, J., Landin, W. E., Oberly, R., & Sherman, W. (1981). Acute and subchronic toxicity studies of rats exposed to vapors of methyl mercaptan and other reduced-sulfur compounds. *J Toxicol Environ Health*, 8, 71–88. <https://doi.org/10.1080/15287398109530051>

49. Prior, M., Green, F., Lopez, A., Balu, A., DeSanctis, G. T., & Fick, G. (1990). Capsaicin pretreatment modifies hydrogen sulphide-induced pulmonary injury in rats. *Toxicol Pathol.* 18:279–288. <https://doi.org/10.1177/019262339001800206>

50. Khan, A. A., Schuler, M. M., Prior, M. G., Yong, S., Coppock, R. W., Florence, L. Z., & Lilly, L. E. (1990). Effects of hydrogen sulfide exposure on lung mitochondrial respiratory chain enzymes in rats. *Toxicol Appl Pharmacol*, 103, 482–490. [https://doi.org/10.1016/0041-008x\(90\)90321-k](https://doi.org/10.1016/0041-008x(90)90321-k)

51. Lopez, A., Prior, M., Yong, S., Albassam, M., & Lillie, L. E. (1987). Biochemical and cytological alterations in the respiratory tract of rats exposed for 4 hours to hydrogen sulfide. *Fundam Appl Toxicol*, 9, 753–762. [https://doi.org/10.1016/0272-0590\(87\)90182-5](https://doi.org/10.1016/0272-0590(87)90182-5)

52. Lopez, A., Prior, M., Lillie, L. E., Gulayets C., & Atwa, O. S. (1988a). Histologic and ultrastructural alterations in lungs of rats exposed to sub-lethal concentrations of hydrogen sulfide. *Vet Pathol.*, 25, 376–384. <https://doi.org/10.1177/030098588802500507>

53. Lopez, A., Prior, M., Yong, S., Lillie, L., & Lefebvre, M. (1988). Nasal lesions in rats exposed to hydrogen sulfide for four hours. *Am J Vet Res.* 49:1107–1111. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3421534/> (date of access: 25.04.2025).

54. Beck, J. F., Cormier, F., & Donini, J. C. (1979). Combined toxicity of ethanol and hydrogen sulfide. *Toxicol Lett.*, 3, 311–313. [https://doi.org/10.1016/0378-4274\(79\)90009-2](https://doi.org/10.1016/0378-4274(79)90009-2)

55. Kage, S., Nagata, T., Kimura, K., Kudo, K., & Imamura, T. (1992). Usefulness of thiosulfate as an indicator of hydrogen sulfide poisoning in forensic toxicological examination: A study with animal experiments. *Jpn J Forensic Toxicol.*, 10(3), 223–227.

56. Smith, R. P., & Gosselin, R. E. (1964). The influence of methemoglobinemia on the lethality of some toxic anions: II. Sulfide. *Toxicol Appl Pharmacol*, 6, 584–592. [https://doi.org/10.1016/0041-008x\(64\)90090-0](https://doi.org/10.1016/0041-008x(64)90090-0)

57. Lopez, A., Prior, M. G., Reiffenstein, R. J., & Goodwin, L. R. (1989). Peracute toxic effects of inhaled hydrogen sulfide and injected sodium hydrosulfide on the lungs of rats. *Fundam Appl Toxicol.*, 12, 367–373. [https://doi.org/10.1016/0272-0590\(89\)90053-5](https://doi.org/10.1016/0272-0590(89)90053-5)

58. AfTSaDR U.S. Department of Health and Human Services, Division of Toxicology and Environmental Medicine/Division of Applied Toxicology (ed.) (2016). Toxicological Profile of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide. Atlanta, GA. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK591605/> (date of access: 25.04.2025).
59. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine (2005). Svyinarski pidpriemstva (kompleksy, fermi, mali fermi): VNTP-APK-01.05 [Departmental norms of technological design. Pig enterprises (complexes, farms, small farms)] [in Ukrainian]. Retrieved from https://lugdpss.gov.ua/images/bezpechnist_veterynariya/Svyinarski-pidpryyemstva-VNTP-APK-02.05.pdf (date of access: 25.04.2025).
60. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine (2005). Skotarski pidpriemstva (kompleksy, fermi, malifermi): VNTP-APK-02.05 [Departmental norms of technological design. Cattle enterprises (complexes, farms, small farms)] [in Ukrainian]. Retrieved from <https://dbn.co.ua/load/normativy/vntp/14-1-0-1039> (date of access: 25.04.2025).
61. Ministry of Agrarian Policy of Ukraine (2007). Pidpriemstva zvirivnytstva ta krolivnytstva: VNTP-APK-05.07 [Departmental norms of technological design. Animal and rabbit breeding enterprises] [in Ukrainian]. Retrieved from https://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67808 (date of access: 25.04.2025).
62. Schiffman, S. S., Auvermann, B. W., & Bottcher, R. W. (2002). Health effects of aerial emissions from animal production waste management systems. National Center for Manure and Animal Waste Management White Papers (North Carolina State University, Raleigh, NC. Retrieved from <https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=1&AID=23886&CID=aqwm2007&T=1> (date of access: 25.04.2025).
63. Saeedi, A., Najibi, A., & Mohammadi-Bardbori, A. (2015). Effects of long-term exposure to hydrogen sulfide on human erythrocytes. *Intern J of Occupation and Environmental Health*, 6(1), 20–25. Retrieved from <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25588222/> (date of access: 25.04.2025).
64. Guidotti Tee L. (2010). Hydrogen Sulfide: Advances in Understanding Human Toxicity. *Intern J of Toxicology*, 29(6), 569–581. <https://doi.org/10.1177/1091581810384882>
65. Helmi, N., Pripp-Boos, K., Vons, K., Lenoir, V., Abou-Hamdan, A., Guedouari-Bounihi, H., Lombès, A., & Bouillaud, F. (2014). Oxidation of hydrogen sulfide by human liver mitochondria. *Nitric Oxide*, 41, 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2014.05.011>
66. Aneja, V. P., Blunden, J., Roelle, P. A., Schlesinger, W. H., Knighton, R., & Niyogi, D. (2008). Workshop on agricultural air quality: state of the science. *Atmospheric Environment*, 42(14), 3195–3208. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.043>
67. Kilburn, K. H. (2012). Human impairment from living near confined animal (hog) feeding operations. *J Environ Public Health*, 2012, 565690. Retrieved from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3306954/> (date of access: 25.04.2025).
68. U.S. Environmental Protection Agency (1993). Report to Congress on Hydrogen Sulfide Air Emissions Associated with Oil and Natural Gas Production. Research Triangle Park, North Carolina: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. EPA-453/R-93-045. Retrieved from <https://www.osti.gov/biblio/5394599> (date of access: 25.04.2025).
69. WHO (1981). Environmental health criteria: Hydrogensulfide. Geneva, Switzerland: World Health Organization. <https://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc019.htm> (date of access: 25.04.2025).
70. Hill, F. B. (1973). Atmospheric sulfur and its links to the biota. *Brookhaven Symp Biol.*, 30, 159–181.
71. Cox, R., & Sheppard, D. (1980). Reactions of OH radicals with gaseous sulfur compounds. *Nature*. 284, 330–331. <https://doi.org/10.1038/284330a0>
72. Millero, F. J., Hubinger, S., Fernandez, M., & Garnett, S (1987). Oxidation of H₂S in sea water as a function of temperature, pH and ionic strength. *Environ Sci Technol*, 21, 439–443. <https://doi.org/10.1021/es00159a003>
73. Millero, F. J., LeFerriere, A., Fernandez, M., Hubinger, S., & Hershey, J. P. (1989). Oxidation of hydrogen sulfide with H₂O₂ in natural waters. *Environ Sci Technol*, 23(2), 209–213. <https://doi.org/10.1021/es00179a012>

74. O'Neil, M. J., Heckelman, P. E., Koch, Ch. B., & Roman, K. J. (eds.) (2001). Hydrogen sulfide. The Merck index. An encyclopedia of chemicals, drugs, and biologicals. Whitehouse Station, NJ: Merck & Co., Inc.
75. Torrance, E. L., & Clemens, G. P. (1982). Physiological and biochemical effects of acute exposure to hydrogen sulfide in fish. *Comp Biochem Physiol* 1, 71(2), 183–190. [https://doi.org/10.1016/0306-4492\(82\)90034-X](https://doi.org/10.1016/0306-4492(82)90034-X)
76. Bagarinao, T., & Vetter, R. D. (1992). Sulfide-hemoglobin interactions in the sulfide-tolerant salt marsh California killifish *Fundulus parvipinnis*. *J of Comparative Physiology B*, 162, 614–624. <https://doi.org/10.1007/BF00296642>
77. Fryer, J. M. (2018). Soil Properties That Influence the Occurrence of Hydrogen Sulfide Toxicity in Rice Fields. Graduate Theses and Dissertations Retrieved from <https://scholarworks.uark.edu/etd/2640> (date of access: 24.04.2025).
78. Li, P., Li, M., Liu, Zh., Zhao, Y., Qian, X., & Huang, P. (2022). Effect of high temperature and sulfur vapor on the flammability limit of hydrogen sulfide. *J of Cleaner Production*, 337, 130579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130579>
79. Chen, B., Kozel, J. A., Li, M., O'Brien, S. K., Li, P., & Brown, R. K. (2021). Reduction of acute hydrogen sulfide and ammonia emissions from pig manure during three-hour mixing using granular biochar. *Atmosphere*, 12(7), 825. <https://doi.org/10.3390/atmos12070825>
80. Wi, J., Lee, Sh., Kim, A., Kim, A., Lee, M., Kozel, J. A., & Ahn, H. (2019). Evaluation of the effectiveness of a semi-continuous manure pit replenishment system in reducing ammonia and hydrogen sulfide emissions from a pig fattening barn. *Atmosphere*, 10(4), 170. <https://doi.org/10.3390/atmos10040170>
81. Vorobel, M. I., Kaplinskyi, V. V., Klym, O. Ya., Dmytrotsa, A. I., & Telushko, H. Ya. (2022). Efektyvnist vplyvu riznykh doz biopreparatu Kapeliukhiv Yarok na riven vydilennia shkidlyvykh haziv z kuriachoho poslidu [Effectiveness of the effect of different doses of the biological preparation Kapelyukhiv Yarok on the level of emission of harmful gases from chicken droppings]. *Visnyk ahraimoi nauky [Bulletin of agricultural science]*, 2, 67–73 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202202-09>
82. Lim, T. T., Heber, A. J., Ni, J. Q., Sutton, A. L., & Shao, P. (2003). Atmospheric pollutants and trace gases: Odor and gas release from anaerobic treatment lagoons for swine manure. *J Environ Qual.*, 32(2), 406–416. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.4060>
83. Zahn, J. A., Hatfield, J. L., Laird, D. A., Hart, T. T., Do, Y. S., & DiSpirito, A. A. (2001). Functional classification of swine manure management systems based on effluent and gas emission characteristics. *Journal of Environmental Quality*, 30(2), 635–647. <https://doi.org/10.2134/jeq2001.302635x>
84. Biletskyi, V. S., & Orlovskiy, V. M. Biohaz [Biogas]. *Velyka ukrainska entsyklopediia [Great Ukrainian Encyclopedia]* [in Ukrainian]. Retrieved from <https://vue.gov.ua/Bioraz> (date of access: 25.04.2025)..
85. Sanzhara. R. A., & Lesnovska, O. V. (2024). Tekhnolohiia pererobky vidkhodiv silskohospodarskoho vyrobnytstva [Technology of processing agricultural waste]. Dnipro [in Ukrainian]. Retrieved from <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/11992> (date of access: 25.04.2025).
86. Holub, H. A., Dubrovin, V. O., Polishchuk, V. M., Siera, K. M., Marus, A. O., Drahnev, S. V., Sydorchuk, O. V. ...& Shcherbak, S. D. (2015). Biohaz. [Biogas]. Kyiv [in Ukrainian]. Retrieved from http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/5144/1/Biogaz_TM7.pdf (date of access: 29.04.2025).
87. Bioenerhetyka v Ukraini [Bioenergy in Ukraine]. *Official website UABIO* [in Ukrainian]. Retrieved from <https://uabio.org/bioenergy-in-ukraine/> (date of access: 22.09.2025)..
88. Biogas desulfurization. *Website Knowledge Ridge*. Retrieved from <https://www.knowledgeridge.com/expert-views/biogas-desulfurization> [in Ukrainian] (date of access: 09.06.2024).
89. Dumont, E. (2015). H₂S removal from biogas using bioreactors: a review. *Intern J of Energy and Environment (IJEE)*, 6(5), 479–498. Retrieved from <http://www.ijee.ieefoundation.org/> (date of access: 22.04.2025).
90. Chemical Products Industries Inc. Hydrogen sulfide removal from natural gas and biogas. *Site Chemical Products Industries, Inc.* Retrieved from <https://www.chemicalproductsokc.com/sulfurtrap-h2s-removal-gas/> (date of access: 30.09.2025).

91. Yadav, A., & Kale, S. (2021). Hydrogen Sulfide Control via Biotrickling Filters. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(3), 457–468. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01972-3>
92. Guo, L., Zhao, B., Jia, Y., He, F., & Chen, W. (2022). Strategies for reducing air pollution in mechanically ventilated livestock and poultry houses – a review. *Atmosphere*, 13(3), 452. <https://doi.org/10.3390/atmos13030452>
93. Ni, J.-Q. (2021). Factors affecting toxic hydrogen sulfide concentrations on swine farms - Sulfur source, release mechanism, and ventilation. *J Clean. Prod.*, 322, 129–126. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621033151> (date of access: 22.04.2025).
94. Kafle, G. K., Chen, L., Naibling, H., & He, B. B. (2015). Field evaluation of downflow wood bark-based biofilters for reducing odor, ammonia, and hydrogen sulfide emissions from closed pig houses. *J Environ. Manag.*, 147, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.004>
95. Dumont, E., Cabral, F. D. S., LeCloirec, P., & Andrés, Y. (2013). Biofiltration using peat and nutrient synthetic packing material: influence of packing configuration on H₂S removal. *Environ. Technol.*, 34, 1123–1129. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.736691>
96. Nour, M. M., Cheng, Y.-H., Ni, J.-Q., Sheldon, E., Field, W. E. (2021). Summary of injuries 139 and fatalities involving livestock manure storage, handling, and transport operation in seven 140 central states: 1976–2019. *J Agric. Saf. Health*, 27, 105–122. <http://doi.org/10.13031/jash.14343>
97. Oesterhelweg, L., & Püschel, K. (2008). Death may come on like a stroke of lightning. Phenomenological and morphological aspects of fatalities caused by manure gas. *Int. J. Legal. Med.* 122(2), 101–107. <http://doi.org/10.1007/s00414-007-0172-8>
98. Liu, Sh., Ni, J.-K., Radcliffe, J. S., & Vonderohe, C (2017). Hydrogen sulfide emissions from a pig farm affected by crude protein in the diet. *J of Environmental Management*, 204(1), 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.0>

THE IMPACT OF HYDROGEN SULFIDE EMISSIONS FROM LIVESTOCK FACILITIES ON THE AIR QUALITY OF THE WORKING AREA OF BUILDINGS AND THE ENVIRONMENT (REVIEW)

M. S. Nebylytsia, O. V. Boiko, O. M. Havrish, O. F. Honchar,
O. V. Voloshchuk T. G. Osokina

*Cherkasy Research Station of Bioresources of the NAAS (Cherkasy, Ukraine)
76 Pasterivska St., Cherkasy, Ukraine, 18036*

Objective. To identify the main sources of H₂S emissions in livestock farming. To quantify its concentration levels in the air of the working area and emission factors into the outside air. To assess the toxicometric effect of H₂S on the health of animals and humans at different levels of exposure. To determine ways to minimize environmental pollution. Methods. A desk-based analysis of literary, scientific, and regulatory materials and an evaluation method were used to summarize the data collected. Results. According to literature data, hydrogen sulfide (H₂S) is a colorless, flammable gas with the odor of rotten eggs. It is heavier than air, therefore it is most dangerous when it is formed as a result of the decomposition of organic matter in sewage systems, cesspools, and tanks for storing liquid manure. If precautions are not taken, it can cause poisoning of people working on cleaning and maintaining these facilities. Inefficient storage and disposal systems for manure and poultry droppings can lead to the accumulation of H₂S and its emissions into the environment. Hydrogen sulfide exhibits a peculiar behavior of releasing bubbles in tanks with liquid manure. There are data on unexpected outbreaks of H₂S release and a sharp increase in its concentration from manure storage tanks. In addition, an increase in H₂S concentration occurs in livestock buildings, especially during manure removal operations. This can lead to the accumulation of high concentrations of H₂S in the air of the working area. At H₂S concentrations above 100 ppm, olfactory receptors completely lose their functions. This makes the smell of gas an ineffective warning of danger. The negative consequences of H₂S emissions are manifested by toxicological effects on animal and human health. The gas can cause headaches, nausea, dizziness, and at concentrations above 700 ppm - severe poisoning and death. The weighted average concentration level of H₂S in the air of the working area of various types of livestock buildings is mainly less than 1000 ppb. The average daily emission factors of hydrogen sulfide

from premises for dairy cows range from 401 to 7162 mg/day per cow; from poultry houses - from 462 to 508 mg AU⁻¹ (conditional unit of animals 500 kg); from pig houses - from 220 to 1250 mg AU⁻¹ day⁻¹. H₂S emissions from anaerobic lagoons for storing liquid pig manure are 492.5 mg/m²·day⁻¹. **Conclusions.** To reduce hydrogen sulfide emissions, it is necessary to implement effective manure disposal systems, improve ventilation in livestock facilities, and use balanced animal feeding rations.

Keywords: hydrogen sulfide, concentration, emission, livestock building, working area, level of impact, method of minimizing pollution

For citation (APA Style):

Nebylytsia, M. S., Boiko, O. V., Havrish, O. M., Honchar, O. F., Voloshchuk, O. V., & Osokina, T. H. (2025). Vplyv emisii sirkovodniu vid ob'ektiv tvarynyntstva na yakist povitria robochoi zony budivel i dovkillia (ohliadova) [The impact of hydrogen sulfide emissions from livestock facilities on the air quality of the working (review)]. *Svynarstvo i Ahropromyslove Vyrobnystvo* [Pig Breeding and Agroindustrial Production]. Poltava, 5–6(83–84), 95–121 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.37143/2786-7730-2025-5-6\(83-84\)7](https://doi.org/10.37143/2786-7730-2025-5-6(83-84)7)

Використання штучного інтелекту (ШІ):

Автори заявляють про використання генеративного ШІ у процесі дослідження та підготовки рукопису. Відповідно до таксономії GAIDeT (2025), наведені нижче завдання були делеговані інструментам генеративного ШІ за повного людського нагляду: формулювання дослідницьких питань і гіпотез. Використаний інструмент генеративного ШІ: Gemini 1.5.

Відомості про авторів:

Небилиця Микола Степанович, кандидат сільськогосподарських наук, завідувач відділу тваринництва та виробництва екологічно чистої продукції, Черкаська ДСБ НААН

Бойко Олександр Васильович, кандидат с.-г. наук, с. д., директор Черкаської ДСБ НААН

Гавриш Олександр Миколайович, кандидат сільськогосподарських наук, ст. дослідник, заступник директора з наукової роботи Черкаської ДСБ НААН

Гончар Олексій Федорович, кандидат сільськогосподарських наук, с. н. с., завідувач відділу біорізноманіття та екології Черкаської ДСБ НААН

Волощук Олександр Васильович, кандидат сільськогосподарських наук, заступник завідувача відділу тваринництва та виробництва екологічно чистої продукції Черкаської ДСБ НААН

Осокіна Тетяна Григорівна, наукова співробітниця відділу біорізноманіття та екології Черкаської ДСБ НААН