

Основные подходы к снижению запахового загрязнения окружающей среды предприятиями животноводства (обзор)

© 2024. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., доцент, с. н. с.,
Л. В. Пилип², к. в. н., доцент,

Т. Я. Ашихмина^{1,3}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. К. Маркса, д. 112,

²Вятский государственный агротехнологический университет,

610017, Россия, г. Киров, Октябрьский проспект, д. 133,

³Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,

167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,

e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Функционирование современного промышленного животноводства сопровождается выбросами в окружающую среду широкого спектра запахообразующих веществ (ЗОВ), оказывающих негативное влияние на здоровье и качество жизни населения. Проблема защиты атмосферного воздуха от запахового загрязнения (ЗЗ) актуальна и практически значима. В данном обзоре даётся критическая оценка научных публикаций, посвящённых контролю ЗЗ, источниками которого являются животноводческие и птицеводческие предприятия. Рассматриваемые авторами методы контроля включают обработку навоза/помёта дезодорирующими материалами (реагентами, сорбентами, ферментами и др.); инокуляцию штаммами микроорганизмов; корректировку рационов животных; очистку воздуха от загрязняющих веществ; оптимизацию рассеивания ЗОВ; изоляцию источников ЗЗ; маскировку запаха. Ориентация сельского хозяйства на внедрение зелёных технологий усилила интерес к поиску экологически безопасных методов борьбы с запахом. К таким методам можно отнести применение растительных экстрактов, натуральных сорбентов, эффективных штаммов микроорганизмов, биофильтров, биоскрубберов, биогазовых установок, посадку защитных лесополос, способствующих поглощению пыли и дисперсии ЗОВ. Каждый метод контроля ЗЗ имеет свои преимущества и недостатки. Современные «зелёные» методы, позволяющие эффективно устранять запах на крупных предприятиях, требуют высоких инвестиционных и эксплуатационных затрат, что ограничивает их внедрение в практику, а относительно низкзатратные методы (применение реагентов, сорбентов, ароматизаторов, кормовых добавок) обычно недостаточно эффективны. Приемлемый результат можно получить за счёт комбинирования различных методов ограничения эмиссии ЗОВ. Стратегию контроля выбирают с учётом источника запаха, эффективности технологии в условиях конкретного хозяйства, а также соотношения затрат к получаемой экономической выгоде от внедрения технологии контроля запаха в практику.

Ключевые слова: животноводство, птицеводство, навоз, помёт птиц, запах, способы снижения запаха.

Basic approaches to reducing odor pollution of the environment by livestock farms (review)

© 2024. N. V. Syrchina¹ ORCID: 0000-0001-8049-6760[†]

L. V. Pilip² ORCID: 0000-0001-9695-7146[†]

T. Ya. Ashikhmina^{1,3} ORCID: 0000-0003-4919-0047[†]

¹Vyatka State University,

36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,

²Vyatka State Agrotechnological University,

133, Oktyabrsky Pr., Kirov, Russia, 610017,

³Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktывkar, Russia, 167982,

e-mail: nvms1956@mail.ru, pilip_larisa@mail.ru, ecolab2@gmail.com

Modern industrial livestock production is accompanied by emissions into the environment of a wide range of odor-forming substances (OFS), which negatively affect the health and quality of life of the population. The problem of protecting atmospheric air from odour pollution (OP) is of high relevance and practical significance. The review critically appraises scientific publications on the control of OP from livestock and poultry farms. Methods of control include the processing of manure with deodorizing materials (reagents, sorbents, enzymes, etc.); inoculation with microorganism strains; adjustment of animal diets; air purification from pollutants; optimization of dispersion; isolation of OP sources; and odor masking. Agriculture's focus on adopting green technologies has increased interest in searching environmentally friendly methods of odor control. These are the use of plant extracts, natural sorbents, effective microorganism strains, biofilters, bioscrubbers, biogas plants, planting of protective forest belts that promote the absorption of dust and dispersion of OFS. Each method of OP control has both advantages and disadvantages. Modern "green" methods effectively eliminate odors in large farms, but require high investment and operating costs, which limits their implementation in practice, and relatively low-cost methods (the use of reagents, sorbents, flavoring agents, feed additives) are usually not effective enough. An acceptable result can be obtained by combining various methods of limiting the OFS emission. Control strategies should be selected based on the source of the odor, the effectiveness of the technology on the particular farm, and the cost/benefit ratio of the odor control technology into practice.

Keywords: livestock farming, poultry farming, manure, bird droppings, odor, odor reduction methods.

Запаховое загрязнение (ЗЗ) окружающей среды (ОС) обусловлено наличием в атмосферном воздухе определённых веществ, обнаруживаемых органами обоняния человека. Особые проблемы в плане ЗЗ вызывают летучие соединения (ЛС) с очень низким порогом восприятия, которые находятся в воздухе в незначительной концентрации. Неприятные навязчивые запахи (НЗ) оказывают выраженное раздражающее воздействие на психическое состояние, здоровье, работоспособность и качество жизни населения. В связи с этим во многих странах предпринимаются серьёзные усилия, направленные на контроль ЗЗ и внедрение технологий, позволяющих минимизировать выбросы запахообразующих веществ (ЗОВ) в атмосферный воздух [1, 2]. Ужесточение требований к качеству атмосферного воздуха характерно и для РФ. В 2019 г. в России началась реализация федерального проекта «Чистый воздух», в котором поставлена задача снизить объёмы выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) на 2 млн т к 2026 г. С 1 января 2024 г. вступил в силу Федеральный закон от 28.04.2023 № 177-ФЗ, в соответствии с которым в городах-участниках проекта «Чистый воздух» квотируемые объекты I и II категорий будут оснащены приборами автоматического контроля выбросов «приоритетных» ЗВ. Одновременно начало действовать Распоряжение Правительства РФ от 20.10.2023 № 2909-р, расширяющее перечень ЗВ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования. Многие вещества, включённые в обновлённый перечень, обладают НЗ (галогенопроизводные углеводородов, спирты, фенолы, альдегиды, серосодержащие соединения, амины и др.). В связи с принятыми документами природоохранная документация объектов,

оказывающих негативное воздействие на ОС (НВОС) потребует уточнения и доработки. В число таких объектов входят предприятия по разведению сельскохозяйственных животных и птицы. В зависимости от проектной мощности и производительности соответствующие объекты относят к I (значительное НВОС) или II (умеренное НВОС) категориям [3, 4].

В процессе деятельности птицеводческих и животноводческих предприятий в ОС поступает широкий перечень разнообразных ЗВ, при этом особое раздражение населения вызывают вещества, обладающие НЗ [5, 6]. Основной вклад в формирование ЗЗ вносят системы накопления и обезвреживания побочных продуктов животноводства (ППЖ): помёта птиц, подстилки, навоза, навозных стоков (НС) [7]. Проблема устранения ЗЗ, связанного с функционированием животноводческих комплексов, представляет высокую актуальность и практическую значимость.

Цель работы – систематизировать и критически оценить мировой опыт и перспективные научные разработки в сфере устранения запахового загрязнения окружающей среды животноводческими и птицеводческими предприятиями.

Объекты и методы исследования

Статья представляет собой обзор, направленный на структурирование, критический анализ и обобщение опубликованных данных по рассматриваемой проблеме. Базу обзорной статьи составляют результаты научных исследований, посвящённых вопросам снижения ЗЗ, за период с 2000 по 2024 гг. Для поиска источников научной и технической информации использовали сервисы Scopus, Web of Science,

Google Scholar, eLIBRARY, КиберЛенинка, Академия Google, ИС «Поисковая платформа» Роспатента. Подбор публикаций проводили по таким ключевым словам, как: животноводство, навоз, навозные стоки, побочные продукты животноводства, методы устранения запаха, наилучшие доступные технологии, а также по ключевым словам из научных статей аналогичной тематики. Ключевые слова использовали в русскоязычном и англоязычном вариантах с корректировкой лексического значения терминов. Кроме электронного поиска в международных и национальных базах данных применяли ручной поиск релевантной информации в ведущих научных и отраслевых журналах, библиографических списках, материалах конференций, книгах и других изданиях. При обзоре предметного поля ориентировались на нелинейный характер отбора публикаций. Особое внимание уделяли вопросам, связанным с экологическими аспектами внедрения предлагаемых технологий, затратами на их реализацию, возможностью применения в условиях РФ.

Запаховое загрязнение окружающей среды предприятиями животноводства

Современное интенсивное животноводство, характеризующееся концентрацией значительного поголовья на ограниченных площадях, является источником выраженного ЗЗ как на территории самих предприятий, так и за её пределами. Основной вклад в ЗЗ вносят процессы микробиологической и ферментативной конверсии корма в толстом кишечнике животных, а также неполное микробиологическое разложение экскрементов в анаэробных условиях, в результате чего в ОС поступает значительное количество ЛС [8–10]. Согласно [11], ежедневные выбросы ЛС из кала крупного рогатого скота (КРС) достигают 1,75 г, а из мочи 1,52 г на 1 голову (или 638,8 г из кала и 554,8 г из мочи в год). Запах навоза КРС обусловлен наличием широкого спектра летучих жирных кислот (энантовой, капроновой, изомазляной, изовалериановой и др.), гетероциклических соединений (индола, скатола), серосодержащих органических соединений (диметилдисульфида, диметилтрисульфида) [12].

Сложный многокомпонентный состав ЗОВ характерен и для свиного навоза, в котором идентифицировано до 400 ЛС. Особый вклад в формирование запаха свиных НС вносят п-крезол, скатол, 4-этилфенол, 4-метилфенол,

уксусная кислота, NH_3 , H_2S , диметилсульфид, диметилдисульфид и диметилтрисульфид [13, 14], а также триметиламин, масляная, пропионовая, валериановая и изовалериановая кислоты [15]. По имеющимся оценкам, объёмы выбросов летучих органических веществ (ЛОС), NH_3 и H_2S из свиарников составляют 0,4; 2,8 и 0,1 кг/год на 1 свинью соответственно [16].

Запах куриного помёта обусловлен сочетанным воздействием на органы обоняния до 150 соединений, включая летучие жирные кислоты (ЛЖК), меркаптаны, сложные эфиры, карбонилы, альдегиды, спирты, аммиак, амины. Годовые выбросы ЛОС от одной курицы достигают 405 г/год [17, 18].

Если принять среднюю массу 1 коровы за 500 кг, свиньи – 100 кг, курицы – 4 кг, то выбросы ЛС из навоза КРС, свиней и помёта кур составят 2,4; 33,0; 101,0 г на 1 кг массы животного в год соответственно.

Борьба с распространением НЗ представляет весьма сложную проблему, обусловленную специфическим химическим составом ППЖ (значительным содержанием биогенных органических компонентов, в результате микробиологической деструкции которых образуются различные по химической природе ЗОВ); высоким выходом ППЖ на единицу основной продукции; длительным периодом биологической деградации (минерализации) органических веществ, входящих в состав ППЖ; низким порогом восприятия запаха биогенных ЗОВ; неготовностью населения мириться с наличием НЗ [19–21].

В настоящее время опубликовано значительное количество работ, посвящённых проблеме контроля ЗЗ. Предлагаемые решения включают корректировку рациона животных; обработку ППЖ для ограничения интенсивности гнилостных процессов и эмиссии ЗОВ; очистку воздуха от ЗВ; оптимизацию рассеивания ЗОВ; изоляцию источников ЗЗ; маскировку (изменение гедонистического тона) запаха [16, 22]. Так, для снижения интенсивности НЗ американским фермерам рекомендуется подавлять микробиоту ППЖ с помощью биоцидных препаратов, дезинфицирующих средств, регуляторов pH, охлаждения, пастеризации или высушивания; хранить ППЖ в таких местах, в которых НЗ вызывают меньше проблем для населения; корректировать рацион животных в сторону уменьшения содержания в кормах азота и серы; регулировать нагрузку лагун таким образом, чтобы выделяющиеся ЗОВ успевали метаболизироваться аэробной

микробиотой; использовать химические фильтры и биофильтры для очистки воздуха от ЗОВ; ограждать территории ферм живыми изгородями из деревьев для рассеивания (дисперсии) запахов [23, 24]. Стратегия контроля запаха выбирается в зависимости от того, что является его источником (помещения для содержания животных, места хранения ППЖ или объекты землепользования), а также насколько эффективной будет та или иная технология в условиях конкретного хозяйства, каково соотношение затрат и получаемой экономической выгоды от внедрения технологии контроля ЗЗ в практику [25].

Обработка ППЖ дезодорирующими добавками

Снижение эмиссии ЗОВ может быть достигнуто за счёт обработки НС химическими реагентами, ферментами и/или сорбентами, способными подавлять гнилостную микробиоту или устранять НЗ за счёт разрушения, связывания или маскировки ЗОВ. Перечень реагентов и материалов, которые можно использовать для обработки ППЖ, ограничивается следующими требованиями: экологическая безопасность, безвредность для здоровья людей и животных, экономичность, низкие нормы расхода. Соответствующие требования существенно ограничивают возможности выбора дезодорирующих добавок.

К преимуществам обработки реагентами можно отнести быстрое достижение необходимого эффекта. К недостаткам – дополнительное загрязнение ОС химическими веществами и продуктами реакции, высокие затраты на приобретение реактивов, относительную кратковременность достигаемого эффекта, обусловленную быстрым восстановлением гнилостной микробиоты в богатой питательными веществами среде [26]. Несмотря на указанные недостатки, интерес к поиску дезодорирующих материалов не исчезает. Химические добавки могут оказывать непосредственное или опосредованное воздействие на эмиссию ЗОВ. Непосредственное воздействие обусловлено химической деструкцией ЗОВ или связыванием ЛС в нелетучие соединения. Опосредованное воздействие реализуется за счёт регулирования численности и состава населяющей НС микробиоты. Следует отметить, что практически все химические реагенты, используемые для обработки НС, оказывают влияние как на состояние микробиоты, так и содержание в субстрате ЗОВ [27–29].

Значительное снижение эмиссии ЗОВ наблюдается при обработке НС реагентами подкисляющего или подщелачивающего действия. Смещение рН в неблагоприятную для гнилостной микробиоты область приводит к замедлению процессов деструкции органических веществ, в результате чего органолептические характеристики ППЖ улучшаются. Экспериментально установлено, что подкисление НС до $\text{pH} \leq 5,5$ способствует уменьшению выбросов одорантов и парниковых газов, в частности выбросы NH_3 снижаются на 75–83% [30]. Для подкисления ППЖ могут быть использованы органические или минеральные кислоты. Первый вариант сопряжён с меньшими рисками для ОС, животных и персонала, однако является весьма затратным. Более бюджетный вариант ориентирован на применение минеральных кислот, в частности H_2SO_4 (дешёвая, нелетучая, сильная) [31–33]. В исследованиях [34] установлено, что орошение свиного навоза раствором H_2SO_4 (0,2 моль/л) с помощью дождевальной системы позволяет снизить выбросы NH_3 на 60,8%, интенсивность запаха – на 41,8%. Обработка навоза КРС серной кислотой приводит к сокращению выбросов NH_3 , CH_4 и CO_2 на 61%, 98% и 15% соответственно, причём подкисление обеспечивает более выраженный эффект дезодорации, чем внесение в навоз сорбента – биоугля [35]. Основным недостатком H_2SO_4 , как реагента для обработки ППЖ, является высокая химическая агрессивность, что существенно сдерживает внедрение технологии подкисления в практику животноводства.

Из реагентов подщелачивающего действия практический интерес может представлять известь или известковое молоко. Известь является недорогим, безопасным и эффективным реагентом, позволяющим повысить рН до 12 и более, что приводит к инаktivации микроорганизмов (МО), связыванию H_2S и ЛЖК в нелетучие соли и уменьшению запаха [36–38].

Регулирование рН оказывает влияние не только на микробиоту, но и на химические процессы, протекающие в НС. Так, снижение рН приводит к уменьшению эмиссии NH_3 за счёт перевода этого газа в нелетучую аммонийную форму NH_4^+ , однако параллельно активизируется разложение нелетучих сульфидов и солей органических кислот с выделением в атмосферу малорастворимого H_2S и ЛЖК [39]. При подщелачивании среды направление процессов изменяется на противоположное – ЛЖК и H_2S образуют нелетучие соли, а ион NH_4^+ разрушается с выделением

газообразного NH_3 . Поддержание рН в интервале 6,0–7,5 задерживает образование газообразных NH_3 и H_2S [40], вместе с тем соответствующая область рН является весьма благоприятной для жизнедеятельности большинства МО, разлагающих органические соединения с выделением ЗОВ [41].

Кроме регуляторов рН для обработки ППЖ могут быть использованы реагенты окислительного действия (O_3 , Cl_2 , NaOCl , CaOCl_2 , хлорная известь, H_2O_2 , CaO_2 и др.). Реагенты-окислители характеризуются выраженными бактерицидными свойствами и способностью разрушать многие ЗОВ до не имеющих запаха соединений [42–44]. К недостаткам соответствующих реагентов следует отнести значительную стоимость и высокий расход, в результате чего обработка НС окислителями с целью снижения запаха чаще всего оказывается нерентабельной. Кроме того, такие эффективные окислители, как O_3 и Cl_2 , являются весьма токсичными, а использование их в условиях животноводческих предприятий сопряжено с высокими рисками для персонала и животных.

Наиболее экологичным и достаточно эффективным окислителем является кислород воздуха. Для насыщения НС кислородом используют специальные установки – аэраторы. В среде с высоким содержанием O_2 активизируется деятельность аэробной микробиоты, окисляющей сложные органические соединения до таких продуктов, как CO_2 и H_2O . Сера и азот, входящие в состав органических компонентов навоза, частично ассимилируются микробиотой или окисляются до не имеющих запаха соединений, в результате эмиссия ЗОВ снижается [45–47]. Особенно эффективно в процессе аэрации окисляются ЛЖК [48]. Аэрацию НС в лагунах можно осуществлять в непрерывном или прерывистом режиме, причём обогащать кислородом можно только поверхностный слой (на глубину 80–400 мм). Наиболее эффективному снижению запаха способствует поддержание концентрации растворённого O_2 в поверхностном слое на уровне от 0,5 до 2,5 мг/л [49]. В исследованиях [50] установлено, что при аэрации НС с содержанием сухих веществ от 0,5 до 4,0% в течение 0,5; 2,0 и 4,0 суток при скорости воздушного потока $1,2 \text{ л}\cdot\text{м}^{-3}\cdot\text{с}^{-1}$ удаление ЛЖК составляет от 46,6 до 78,5; от 49,4 до 86,9 и от 48,8 до 95,6% соответственно. Основным недостатком технологии аэрации – высокие инвестиционные и эксплуатационные затраты на аэраторные установки [51].

Одновременное использование различных реагентов позволяет усилить дезодорирующий эффект. В исследованиях [52] показано, что состав, включающий персульфат аммония, надуксусную кислоту и формалин, а также композиция, содержащая молибдат аммония и нитрит натрия, способны обеспечить достаточно долговременное устранение запаха НС.

В ряде исследований обоснована возможность снижения запаха ППЖ за счёт ферментных препаратов, в частности, пероксидаз в сочетании с H_2O_2 или CaO_2 (использование CaO_2 даёт более выраженный результат) [26, 53–54]. Несомненным достоинством соответствующего направления дезодорации является экологическая безопасность. Принцип, лежащий в основе метода, заключается в окислении одорантов согласованным действием пероксидаз и пероксидов, служащих акцепторами электронов. Результаты лабораторных исследований показали, что обработка свиного навоза композицией «пероксидаза+пероксид» позволяет снизить интенсивность запаха на 40–60% при сохранении эффекта дезодорации до 72 часов [55]. В работе [56] приведены результаты испытания соответствующего метода в условиях свиноводческой фермы. В качестве реагентов применяли комбинацию соевой лузги (источник пероксидаз) и CaO_2 . Свиной навоз обрабатывали реагентами поверхностно и однократно в начале 42-дневного эксперимента, норма внесения – $2,28 \text{ кг}/\text{м}^2$ с добавлением 4,2% масс. CaO_2 . Достоверное снижение газообразных выбросов из обработанного навоза по сравнению с контролем наблюдалось по NH_3 (21,7%), H_2S (79,7%), н-масляной кислоте (37,2%), валериановой кислоте (47,7%), изовалериановой кислоте (39,3%), индолу (31,2%), скатолу (43,5%). При этом выбросы диметилдисульфида и метантиола возросли на 30,6%. Общая стоимость обработки (материал + труд) составила 2,62 доллара США на каждую реализуемую свинью.

Ориентация сельского хозяйства на внедрение зелёных технологий усилила интерес к поиску натуральных экологически безопасных дезодорирующих материалов. К таким материалам относят растительные экстракты. Показано [57], что распыление на поверхность навоза экстрактов растений, содержащих эфирные масла кокоса, лимона и чайного дерева, позволяет снизить концентрацию ЗОВ почти на 50%. Дезодорирующее действие экстрактов может быть усилено за

счёт специально подобранных культур МО. Так, совместная обработка птичьего помёта микробиологическим препаратом и экстрактом юкки Шидигера *Yucca schidigera* приводит к снижению концентрации ЗОВ на 58–73% [58]. Добавки тимола и карвакрола (фенольные соединения растительного происхождения) в дозе 2 г/кг свиного навоза снижают численность МО, разлагающих органические вещества и уменьшают эмиссию ЗОВ [59].

Весьма спорным направлением борьбы с НЗ считается технология маскировки НЗ ароматизаторами. Маскировка возникает в том случае, если одорант большей концентрации и интенсивности подавляет ощущение запаха другого одоранта. Технология маскировки не решает проблему ЗЗ, однако снижает уровень неудовлетворённости населения качеством воздуха. Обычно в состав отдушек включают летучие альдегиды с фруктово-травянистым запахом, сложные эфиры, имеющие сладкий фруктово-цветочный аромат, некоторые терпены (пинен – запах сосны, лимонен – запах лимона) [60]. Было показано, что распыление ароматизаторов и эфирного масла уменьшает интенсивность НЗ до 60–80%, при этом эфирные масла оказывают не только маскирующее, но и кратковременное бактерицидное воздействие на источники запаха [61]. Эффект обработки сохраняется до 3 часов. Распыление воды с добавкой эфирных масел помогает скрыть запах органических аминов, меркаптанов и дисульфидов [62]. Следует отметить, что одноразовое применение различных химических реагентов обеспечивает весьма кратковременный эффект снижения НЗ. Для достижения стабильного долгосрочного результата обработку ППЖ реагентами необходимо повторять с определённой периодичностью [8].

Перспективы применения сорбентов

Сорбирующие материалы используют как для обработки ППЖ, так и для очистки газовых выбросов на источниках ЗОВ. Соответствующие технологии не требуют значительных капиталовложений и эксплуатационных затрат, однако приводят к дополнительным проблемам, связанным с необходимостью регенерации или утилизации отработанных сорбентов. Для практического использования в сельском хозяйстве наиболее пригодны сорбирующие материалы, которые можно утилизировать в качестве почвенных мелиорантов или удобрений. Так, для удаления NH_3

из вентиляционных выбросов животноводческих и птицеводческих предприятий в ряде европейских стран (Дания, Нидерланды, Германия) успешно используются одноступенчатые мокрые кислотные скрубберы, в которых абсорбентом служит раствор кислоты. Эффективность поглощения NH_3 в соответствующих установках достигает 40–100%, при этом запах снижается от 3 до 51% (в среднем – 27%) [63]. В аналогичных исследованиях других авторов снижение НЗ отработанного воздуха после обработки в кислотном скруббере составило 16% [64]. К достоинствам кислотных скрубберов можно отнести возможность использования отработанных реагентов в качестве аммонийных азотных удобрений, что делает процесс очистки безотходным [65].

Эффективную очистку газообразных выбросов от широкого спектра ЗОВ обеспечивают сорбенты на основе продуктов пиролиза биомассы и/или органических отходов, получивших название биоуголь или биочар [66]. Несомненными преимуществами биоуглей являются химическая инертность, экологическая безопасность, положительное влияние на свойства почвы. Соответствующий материал, благодаря высокой пористости, значительной удельной поверхности и большому количеству поверхностных функциональных групп, может стать перспективным средством для борьбы с НЗ [67]. Пористая структура и гидрофобные свойства позволяют использовать некоторые разновидности (марки) биоуглей для изготовления плавающих покрытий для лагун. Соответствующие покрытия существенно снижают объёмы эмиссии ЗОВ и других газообразных веществ в атмосферный воздух [68]. Переработка навоза в биоуголь с последующим его использованием в качестве сорбента ЗОВ является хорошим примером циклической экономики, позволяющей минимизировать экологические издержки за счёт увеличения циклов полезного использования материалов.

Кроме угольных сорбентов для очистки воздуха и снижения НЗ внутри животноводческих помещений могут найти применение алюмосиликатные сорбирующие материалы (галлуазит, бентонит, вермикулит и др). Соответствующие сорбенты способны удалять NH_3 и некоторые другие ЛС, выделяемые из птичьего помёта. Согласно экспериментальным данным, наибольшую эффективность проявляют фильтры на основе активированного галлуазита и обожжённого бентонита, поглощающие более 80% ЗОВ [69, 70].

Микробиологические технологии контроля запаха

Технологии, базирующиеся на применении разнообразных непатогенных МО и специально подобранных консорциумов МО, способных метаболизировать ЗОВ, привлекают особое внимание исследователей. Соответствующее направление борьбы с ЗЗ считается наиболее актуальным в связи с ориентацией на внедрение зелёных технологий в практику сельского хозяйства. Процессы микробиологической деградации органических веществ, как правило, носят окислительный характер, а конечные продукты – CO_2 , H_2O , нитраты, сульфаты, фосфаты не представляют экологической опасности. Снижение эмиссии ЗОВ за счёт МО-процессов реализуется в биогазовых установках, биофильтрах, биоскрубберах, а также с помощью микробной инокуляции ППЖ специальными штаммами микроорганизмов-деструкторов. Инокуляция не требует сложного оборудования и может быть использована как в помещениях для содержания животных, так и в местах хранения и обработки НС. Для инокуляции чаще всего применяют специально подобранные штаммы бактерий родов *Bacillus* (*B. subtilis*, *B. megaterium*, *B. licheniformis*), *Lactobacillus* (*L. plantarum*, *L. acidophilus*, *L. argentoratenensis*), некоторые виды *Pseudomonas* (*P. fluorescens*, *Pseudomonas sp.*), *Leuconostoc mesenteroides*, *Enterococcus faecium*, *Streptomyces* (*S. rutgersensis*, *S. plantarum*), а также грибы *Saccharomyces cerevisiae* и *Candida* (*C. tripicalis*, *C. rugosa*, *C. maris*, *C. inconspicua*, *C. glycerinogenes*).

Большинство МО способно удалять из продуктов разложения ограниченное количество компонентов запаха. Относительно высокую скорость деградации NH_3 и H_2S могут обеспечить определённые штаммы *B. licheniformis*, однако эти МО медленно метаболизуют ЛОС. Активно поглощать ЛОС способны *S. cerevisiae* [71]. Снизить эмиссию ЛЖК можно за счёт обработки навоза специально подобранными штаммами дрожжей *Candida maris* и *C. rugosa* [72]. Способность разлагать диметилдисульфид характерна для *Schizophyllum commune* [73]. Устойчивый к биодеградации скатол успешно метаболизуют некоторые штаммы *Rhodococcus* [74]. Штаммы *Bacillus subtilis subsp. spizizenii*, *L. mesenteroides*, *C. inconspicua* и *P. faecalis* способны удалять выделяющиеся из птичьего помёта NH_3 , H_2S , диметиламин, триметил-

амин, изомасляную кислоту [75]. *Pichia kudriavzevii*, *Paracoccus denitrificans* и *Bacillus subtilis* проявляют выраженную способностью метаболизировать NH_3 и H_2S и снижать запах свиного навоза [76]. Аналогичный результат обеспечивает инокуляция навоза специально выделенным штаммом *Lactobacillus* (за 36 дней обработки эмиссия NH_3 и H_2S снижается более чем на 30%, ЛОС – на 40%) [77].

Для поглощения широкого спектра ЗОВ используют консорциумы различных МО, способных к совместному существованию в определённых условиях [78, 79]. В работе [80] приведён пример успешного использования комбинации *Serratia marcescens* и *Bacillus cereus* для биодеструкции масляной кислоты. Эффективный микробиологический препарат для дезодорации птичьего помёта на основе *P. fluorescens*, *E. faecium*, *B. subtilis*, *B. megaterium*, *Leuconostoc mesenteroides*, *L. plantarum* и перлит-бентонитового сорбента-носителя был разработан и описан в работе [81]. Соответствующий препарат, нанесённый на птичий помёт, оказался особенно активным в отношении NH_3 и H_2S , содержание которых в вытяжном воздухе после 2 суток дезодорации снизилось на 94% и 60% соответственно.

Консорциумы МО-биодеструкторов широко используются в таких инженерных сооружениях, как биофильтры (БФ), биоскрубберы (БС), биогазовые установки (БГУ). Биофильтры представляют собой биореакторы, содержащие пористый материал (загрузку) на котором иммобилизована аэробная микробиота, окисляющая ЗВ (в том числе ЗОВ) до безвредных продуктов. Биофильтрационные установки пригодны для обработки больших объёмов одорантов низкой концентрации и могут быть использованы для уменьшения выбросов ЗОВ из животноводческих помещений и мест хранения навоза [82]. Современные управляемые БФ позволяют поглотить до 95% H_2S и до 80% NH_3 [83]. Степень снижения H_2S за счёт БФ может превышать 80% [84, 85]. На эффективность работы БФ большое влияние оказывает температура и степень насыщения раствора кислородом [86]. Поддержание соответствующих параметров на оптимальном уровне требует существенных материальных затрат.

Биоскрубберы представляют собой трёх-фазные биореакторные системы с псевдооживленным слоем. Процесс очистки включает физическое разделение или абсорбцию ЗОВ в водной фазе в абсорбционной колонне и последующую биологическую очистку в жид-

кофазном биореакторе. Обычно биореактор представляет собой аэрируемый резервуар, содержащий взвешенный активный ил [87–89]. Водная фаза циркулирует в БС по замкнутому контуру (скруббер – биореактор), что предотвращает образование производственного стока. Основными преимуществами БС являются эксплуатационная стабильность, возможность эффективного контроля рабочих параметров раствора (рН, дозировка питательных веществ), компактность, пригодность для работы с большими скоростями потока газа и высокими концентрациями ЗВ. Применение БС позволяет весьма эффективно удалять различные виды биогенных ЗОВ [90]. Основным недостатком, сдерживающим внедрение БФ и БС в практику сельского хозяйства для поглощения ЗОВ, являются высокие эксплуатационные затраты [91].

Если в БФ и БС процесс деструкции ЗОВ происходит в аэробных условиях, то в БГУ реализуется анаэробное метановое брожение, позволяющее получать целевой продукт – биогаз, содержащий до 70% CH_4 . Уровень запаха ППЖ после сбраживания обычно снижается [92, 93]. С точки зрения экологии, переработка ППЖ в биогаз весьма привлекательна, однако строительство и эксплуатация БГУ требует высоких затрат, при этом срок окупаемости достигает 5–9 лет [94]. В условиях РФ рентабельность БГУ дополнительно снижается за счёт необходимости подогрева биореактора в холодный период года [95]. Кроме низкой рентабельности, сами БГУ могут выступать источниками ЗЗ [96], что обусловлено особенностями сбраживаемого субстрата. Согласно экспериментальным данным, переработка сырья с высоким содержанием навоза в БГУ приводит к усилению эмиссии ЗОВ [97], в частности H_2S и других соединений серы, удаление которых из биогаза сопряжено с дополнительными затратами [98]. Источником НЗ может выступать не только биогаз, но и сброженный жидкий остаток (эффлюент).

Для снижения НЗ эффлюента может быть использован метод электрохимического окисления растворённых ЗОВ [99] или технология медленной песчаной фильтрации (МПФ) [100]. Соответствующая технология объединяет физические, химические и биологические процессы удаления ЗВ. Системы МПФ, функционирующие как биореакторы с фиксированной средой, устойчивы к изменениям рН, концентрации поверхностно-активных веществ или тяжёлых металлов. Основными компонентами песчаных фильтров являются:

слой надосадочной воды, песчаная подушка (мелкий и крупный песок), гравий и выпускной шланг. Надосадочный слой обеспечивает напор, достаточный для прохождения воды через фильтрующую загрузку с периодом удерживания в течение нескольких часов. Гравий поддерживает песчаный слой, обеспечивает беспрепятственный проход очищенной воды из фильтрующего слоя и предотвращает засорение песком поддренажных труб. Основная очистка происходит в верхней части песчаного слоя, где формируется плотная биоплёнка [101]. К достоинствам МПФ можно отнести невысокие затраты, экономичность, эффективность, экологическую безопасность. Основным недостатком метода – низкая производительность, чувствительность к температурному фактору и необходимость предварительного удаления взвешенных частиц из очищаемых стоков, что ограничивает возможность внедрения соответствующей технологии на крупных животноводческих предприятиях [102–104].

Рассеивание (дисперсия) запахов

Ощущение запаха возникает в том случае, когда концентрация одоранта в атмосферном воздухе достигает порога восприятия. Создание условий для эффективного рассеивания ЗОВ способствует снижению концентрации одорантов и улучшению качества воздушной среды. Для рассеивания ЗОВ от животноводческих предприятий широко используются защитные лесные насаждения (ветрозащитные полосы, растительные экологические буферы). Ветрозащитные полосы (ВП) обеспечивают визуальную изоляцию источников запаха, активно улавливают пыль, рассеивают и частично поглощают ЗОВ, улучшают экологическую обстановку на территории размещения животноводческих предприятий [22, 105, 106]. Поскольку источники запаха (лагуны, компостные площадки, одноэтажные помещения для животных) находятся вблизи поверхности почвы, а шлейф запаха имеет тенденцию распространяться в приповерхностном слое воздуха, ВП даже небольшой высоты (6–12 м) могут быть эффективными для перехвата, разрушения и разбавления шлейфа. Достижимый результат существенно зависит от видового состава растений, а также высоты, пористости и ориентации ВП по отношению к источнику запаха и розе ветров [107]. Согласно опубликованным данным, ВП с оптической пористостью 35% снижают дистанцию максимального распространения

запаха на 21–40% по сравнению с участком без ВП. Оптимальный эффект достигается при использовании ВП, расположенной на расстоянии 15 м по ветру от источника запаха [108]. Известно, что хорошими носителями ЗОВ являются пылевидные частицы. Интенсивному поглощению пыли и снижению ЗЗ способствует включение в состав ВП хвойных, а также лиственных пород деревьев с шероховатой листвой. Деревья и кустарники с гладкими кожистыми листьями удерживают пыль и рассеивают запах значительно хуже [109].

Оптимизация рациона животных

Технологии оптимизации рационов (ОР) направлены на обеспечение максимально сбалансированного содержания питательных веществ в кормах, улучшение конверсии корма в процессе пищеварения, связывание образующихся ЗОВ с помощью сорбентов. Среди основных направлений ОР выделяют уменьшение количества сырого протеина (СП) [110]; частичную замену СП дефицитными аминокислотами (АК) [111]; активизацию пищеварения за счёт кормовых ферментов (целлюлазы, α -амилазы, фитазы) [112]; обогащение рационов пробиотическими препаратами, содержащими важные для нормального пищеварения штаммы бактерий (*Bacillus*, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Rumenococcus*) [113], включение в рацион натуральных адсорбентов, способных поглощать ЗОВ (бентонит, цеолит, каолинит и др.) [114].

Согласно опубликованным данным, уменьшение СП в рационах с 18 до 12% способствует снижению эмиссии метилсульфида, дисульфида углерода, этантиола, фенола, 4-этилфенола, индола и 3-метилиндола, при этом выбросы NH_3 снижаются на 53%, запах – на 80% [10]. Результаты экспериментальных исследований показывают, что уменьшение СП в рационах свиней весом 70 кг до 130 г/кг массы тела позволяет снизить эмиссию NH_3 на 62,4%. Максимальный уровень выбросов NH_3 наблюдается для рационов с содержанием СП 220 г/кг; наиболее сильный запах соответствовал количеству СП 190 г/кг [115]. Избыток белка в рационах сельскохозяйственных животных обусловлен необходимостью восполнения дефицита незаменимых АК (L-метионин, L-лизин и L-триптофан), характерного для натуральных кормов [111]. Включение в рацион АК, с одной стороны, позволяет снизить долю СП, но с другой, сами АК становятся дополнительными источниками ЗОВ. Так, важ-

нейший компонент фекального запаха скатол является метаболитом триптофана [116].

На интенсивность запаха влияет калорийность корма. Согласно данным [117], минимальная калорийность питания (3907 ккал/кг) сопровождалась максимальной интенсивностью запаха навоза.

Заключение

Обзор научных публикаций показывает, что, несмотря на интенсивные исследования в сфере разработки технологий ограничения эмиссии ЗОВ, проблема устранения запаха, связанного с функционированием животноводческих предприятий, до настоящего времени остаётся не решённой. Сложность проблемы обусловлена значительными объёмами образования ППЖ и чрезвычайным разнообразием компонентного состава ЗОВ. Пригодные для внедрения в практику технологии должны соответствовать следующим критериям: эффективность, экологическая безопасность, экономичность, высокая производительность. Ни один из описанных методов контроля ЗЗ не отвечает всем критериям одновременно. Внедрение высокопроизводительных, эффективных и экологически безопасных технологий (анаэробное сбраживание, аэрация, биофильтрация) требует значительных инвестиционных и эксплуатационных затрат, что повышает себестоимость и снижает конкурентоспособность продукции, а относительно низкочастотные технологии (применение химических реагентов, сорбентов, ароматизаторов) не позволяют получить гарантированный результат устранения НЗ.

Улучшению качества атмосферного воздуха на территориях размещения животноводческих комплексов способствует комплексный подход, сочетающий гигиенические мероприятия (регулярную уборку и дезинфекцию мест содержания животных); современные технологии обработки ППЖ (анаэробное сбраживание, аэрацию жидкой фракции, регулирование рН, обработку НС биопрепаратами, удаление ЗОВ из выбросов с помощью фильтров и/или скрубберов); оптимизацию рационов (снижение содержания доли азота и серы в кормах до физиологически обоснованных норм; включение в рацион энтеросорбентов, пребиотиков и пробиотиков); обустройство защитных лесных полос для улавливания пыли и дисперсии ЗОВ с учётом климата, рельефа местности, розы ветров, специфики источников выбросов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ №122040100032-5.

References

1. Wang Y.C., Han M.F., Jia T.P., Hu X.R., Zhu H.Q., Tong Z., Lin Y.T., Wang C., Liu D.Z., Peng Y.Z., Wang G., Meng J., Zhai Z.X., Zhang Y., Deng J.G., Hsi H.C. Emissions, measurement, and control of odor in livestock farms: A review // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 776. Article No. 145735. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145735
2. Brancher M., Griffiths K.D., Franco D., de Melo Lisboa H. A review of odour impact criteria in selected countries around the world // *Chemosphere.* 2017. V. 168. P. 1531–1570. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.11.160
3. Decree of the Government of the Russian Federation of 31.12.2020 No. 2398 “On approval of criteria for classifying objects that have a negative impact on the environment as objects of categories I, II, III and IV” (amended 7.10.2024) [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/57329285> (Accessed: 31.10.2023) (in Russian).
4. Kuzmina T.N., Svinarev I.Yu., Tretyakova O.L. ITS 41-2017 “Intensive pig breeding”: updating’s directions // *Machinery and technologies in livestock.* 2023. No. 1 (49). P. 47–53 (in Russian). doi: 10.22314/27132064-2023-1-47
5. Schiffman S.S., Williams C.M. Science of odor as a potential health issue // *J. Environ. Qual.* 2005. V. 34. No. 1. P. 129–138. doi: 10.2134/jeq2005.0129a
6. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Control of odor pollution of atmospheric air (review) // *Theoretical and Applied Ecology.* 2022. No. 2. P. 26–34 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-2-026-034
7. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P. Safety assessment of regenerated litter obtained at the filtration and drying plant // *Russian Journal of Applied Ecology.* 2023. No. (33). P. 45–51 (in Russian). doi: 10.24852/2441-7374.2023.1.45.51
8. McCrory D.F., Hobbs P.J. Additives to reduce ammonia and odor emissions from livestock wastes: a review // *J. Environ. Qual.* 2001. V. 30. No. 2. P. 345–355. doi: 10.2134/jeq2001.302345x
9. Pilip L.V., Syrchina N.V. The importance of microorganisms-ammonifiers of manure effluents in the emission of ammonia // *KSTU News.* 2023. No. 68. P. 46–54 (in Russian). doi: 10.46845/1997-3071-2023-68-46-54
10. Le P.D., Aarnink A.J., Ogink N.W., Becker P.M., Verstegen M.W. Odour from animal production facilities: its relationship to diet // *Nutr. Res. Rev.* 2005. V. 18. No. 1. P. 3–30. doi: 10.1079/NRR200592
11. Aizawa A., Miyazaki A., Tanaka N. Emissions of volatile organic compounds from dairy cattle manure in a cattle shed in Japan // *Asian J. Atmospheric Environ.* 2022. V. 16. No. 3. P. 122–134. doi: 10.5572/ajae.2022.024
12. Woodbury B.L., Gilley J.E., Parker D.B., Marx D.B. Emission of volatile organic compounds from land-applied beef cattle manure as affected by application method, diet, and soil water condition // *J. ASABE.* 2022. V. 65. No. 1. P. 123–133. doi: 10.13031/ja.14587
13. Marszałek M., Kowalski Z., Makara A. Emission of greenhouse gases and odorants from pig slurry – effect on the environment and methods of its reduction // *Ecol. Chem. Eng. S.* 2018. V. 25. No. 3. P. 383–394. doi: 10.1515/eces-2018-0026
14. Hanajima D., Kuroda K., Morishita K., Fujita J., Maeda K., Morioka R. Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting // *Bioresour. Technol.* 2010. V. 101. No. 7. P. 2306–2310. doi: 10.1016/j.biortech.2009.11.026
15. Ni J.Q., Robarge W.P., Xiao C., Heber A.J. Volatile organic compounds at swine facilities: a critical review // *Chemosphere.* 2012. V. 89. No. 7. P. 769–788. doi: 10.1016/j.chemosphere.2012.04.061
16. Liu Z., Powers W., Mukhtar S. A review of practices and technologies for odor control in swine production facilities // *Appl. Eng. Agric.* 2014. V. 30. No. 3. P. 477–492. doi: 10.13031/aea.30.10493
17. Ranadheera C.S., McConchie R., Phan-Thien K., Bell T. Strategies for eliminating chicken manure odour in horticultural applications // *World’s Poult. Sci. J.* 2017. V. 73. No. 2. P. 365–378. doi: 10.1017/S0043933917000083
18. Dunlop M., Ristovski Z.D., Gallagher E., Parsci G., Modini R.L., Agranovski V., Stuetz R.M. Odour, dust and non-methane volatile organic-compound emissions from tunnel-ventilated layer-chicken sheds: a case study of two farms // *Anim. Prod. Sci.* 2013. V. 53. No. 12. P. 1309–1318. doi:10.1071/AN12343
19. Teuchezh A.A. The technology of accelerated processing of non-pigmented pig manure in organic fertilizer // *Proceedings of the Kuban State Agrarian University.* 2017. No. 65. P. 157–165 (in Russian). doi: 10.21515/1999-1703-65-157-165
20. Haga K. Sustainable recycling of livestock wastes by composting and environmentally friendly control of wastewater and odors // *J. Environ. Sci. Eng. B.* 2021. V. 10. No. 5. P. 163–178. doi: 10.17265/2162-5263/2021.05.001
21. Zicari G., Soardo V., Rivetti D., Cerrato E., Russo D. Livestock farming and atmospheric emissions // *Ig. Sanità Pubbl.* 2013. V. 69. No. 4. P. 445–457.
22. Patterson P.H., Adrizal. Management strategies to reduce air emissions: Emphasis–dust and ammonia // *J. Appl. Poult. Res.* 2005. V. 14. No. 3. P. 638–650. doi: 10.1093/japr/14.3.638
23. Hamilton D.W., Ogejo J.A. Strategies to control farmstead odors // *Oklahoma State University Extension.* 2017. Article No. BAE-2905. [Internet resource] <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/strategies-to-control-farmstead-odors.html> (Accessed: 31.05.2024).

24. Cao T., Zheng Y., Dong H. Control of odor emissions from livestock farms: A review // *Environ. Res.* 2023. V. 225. Article No. 115545. doi: 10.1016/j.envres.2023.115545
25. Karmakar S., Laguë C., Agnew J., Landry H. Integrated decision support system (DSS) for manure management: A review and perspective // *Comput. Electron. Agric.* 2007. V. 57. No. 2. P. 190–201. doi: 10.1016/j.compag.2007.03.006
26. Ye F.X., Zhu R.F., Li Y. Deodorization of swine manure slurry using horseradish peroxidase and peroxides // *J. Hazard. Mater.* 2009. V. 167. No. 1–3. P. 148–153. doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.096
27. Pilip L.V., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P., Rutman V.V. Influence of various types of surfactants on gas emissions and microbiota of the liquid fraction of manure effluents // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 3. P. 59–72 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-059-072
28. Syrchina N.V., Pilip L.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effect of various processing methods on the numbers of *Clostridium* (Clostridia, Bacteria) in animal by-products // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2023. No. 4. P. 466–480 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-4-466-480
29. Kolevatykh E.P., Pilip L.V., Syrchina N.V., Kozvonin V.A., Ashikhmina T.Ya. Transformation of the microbiota of animal husbandry waste under the influence of chemical reagents to eliminate odor // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 159–165 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165
30. Fuchs A., Dalby F.R., Liu D., Kai P., Feilberg A. Improved effect of manure acidification technology for gas emission mitigation by substituting sulfuric acid with acetic acid // *Cleaner Eng. Technol.* 2021. V. 4. Article No. 100263. doi: 10.1016/j.clet.2021.100263
31. Jensen A.Ø. Changing the environment in swine buildings using sulfuric acid // *Trans. ASAE*. 2002. V. 45. No. 1. P. 223–227. doi: 10.13031/2013.7874
32. Pilip L.V., Kozvonin V.A., Syrchina N.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya. Effects of acidifying manure effluent on its microbiological characteristics // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 3. P. 161–167 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-161-167
33. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya., Bogatyryova N.N. Rational utilization of sulfuric acid waste generated during chlorine production // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No. 4. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-143-148
34. Wang K., Wei B., Huang D., Li H., Ye Z. A case study of effects of sulfuric acid spray on ammonia and odor emissions from swine manure composting // *Appl. Eng. Agric.* 2014. V. 30. No. 2. P. 267–276. doi: 10.13031/aea.30.10129
35. Miranda C., Soares A.S., Coelho A.C., Trindade H., Teixeira C.A. Environmental implications of stored cattle slurry treatment with sulphuric acid and biochar: A life cycle assessment approach // *Environ. Res.* 2021. V. 194. Article No. 110640. doi: 10.1016/j.envres.2020.110640
36. Makara A., Kowalski Z., Sówka I. Possibility to eliminate emission of odor from pig manure treated using AMAK filtration method // *Desalination Water Treat.* 2016. V. 57. No. 3. P. 1543–1551. doi: 10.1080/19443994.2014.1002274
37. Abustan, Pudjirahaju A., Arsyad M. Reducing ammonia gas from chicken manure with lime and soybean plants // *Environ. Qual. Manage.* 2019. V. 28. No. 4. P. 49–56. doi: 10.1002/tqem.21635
38. Krach K.R., Burns B.R., Li B., Shuler A., Cole C., Xie Y. Odor control for land application of lime stabilized biosolids // *Water Air Soil Pollut.: Focus*. 2008. V. 8. P. 369–378. doi: 10.1007/s11267-007-9147-5
39. Syrchina N.V., Pilip L.V. The effect of acidification on the sulfide hydrogen emissions in the organic waste of pig farms // *Regional Environmental Issues*. 2021. No. 4. P. 102–106 (in Russian). doi: 10.24412/1728-323X-2021-4-102-106
40. Zhang X.L., Yan S., Tyagi R.D., Surampalli R.Y. Odor control in lagoons // *J. Environ. Manage.* 2013. V. 124. P. 62–71. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.03.022
41. Ayupova A.Zh., Khasenova E.Zh., Sembakova D.Zh., Moldagulova N.B., Sarsenova A.S., Duambekov M.S. Optimization of cultivation conditions of effective microorganisms for fermentation of organic animal wastes // *Herald of Science and Education*. 2019. No. 13–1. V. 67. P. 58–61 (in Russian).
42. Alkoalk F.N. Ozone treatment of animal manure for odor control // *American Journal of Environmental Sciences*. 2009. V. 5. No. 6. P. 765–771. doi: 10.3844/ajessp.2009.765.771
43. Więckol-Ryk A., Thomas M., Białecka B. Improving the properties of degraded soils from industrial areas by using livestock waste with calcium peroxide as a green oxidizer // *Materials*. 2021. V. 14. No. 11. Article No. 3132. doi: 10.3390/ma14113132
44. Syrchina N.V., Pilip L.V., Kolevatykh E.P., Ashikhmina T.Ya., Kuznetsov D.A. Effect of sodium hypochlorite on the microbiota and odor of manure effluents // *Povolzhskiy Journal of Ecology*. 2023. No. 1. P. 107–116 (in Russian). doi: 10.35885/1684-7318-2023-1-107-116
45. Zeng Y., De Guardia A., Ziebal C., De Macedo F.J., Dabert P. Nitrification and microbiological evolution during aerobic treatment of municipal solid wastes // *Bioresour. Technol.* 2012. V. 110. P. 144–152. doi: 10.1016/j.biortech.2012.01.135
46. Xia Y., Lü C., Hou N., Xin Y., Liu J., Liu H., Xun L. Sulfide production and oxidation by heterotrophic bacteria under aerobic conditions // *ISME J.* 2017. V. 11. No. 12. P. 2754–2766. doi: 10.1038/ismej.2017.125
47. Jia T., Zhang L., Zhao Q., Peng Y. The effect of biofilm growth on the sulfur oxidation pathway and the synergy of microorganisms in desulfurization reactors under

- different pH conditions // *J. Hazard. Mater.* 2022. V. 432. Article No. 128638. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128638
48. Halder J.N., Lee M.G. A review on techniques to control and mitigate odors in swine facilities // *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences.* 2020. V. 32. No. 3. P. 297–310. doi: 10.22698/jales.20200024
49. Rahman S., Borhan M.S. Typical odor mitigation technologies for swine production facilities – A review // *J. Civil Environ. Eng.* 2012. V. 2. No. 4. Article No. 117. doi: 10.4172/2165-784X.1000117
50. Zhang Z.J., Zhu J. Effectiveness of short-term aeration in treating swine finishing manure to reduce odour generation potential // *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2005. V. 105. No. 1–2. P. 115–125. doi: 10.1016/j.agee.2004.05.006
51. Janzekovic M., Mursec B., Cus F., Ploj T., Janzekovic I., Zuperl U. Use of machines for liquid manure aerating and mixing // *J. Mater. Process. Technol.* 2005. V. 162–163. P. 744–750. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.215
52. Ratko A.A., Duko Yu.V., Shevchuk V.V. Study of effect of pig manure treatment method on emission of odor-forming substances // *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Series.* 2022. V. 60. No. 2. P. 234–242 (in Russian). doi: 10.29235/1817-7204-2022-60-2-234-242
53. Govere E.M., Tonegawa M., Bruns M.A., Wheeler E.F., Heinemann P.H., Kephart K.B., Dec J. Deodorization of swine manure using minced horseradish roots and peroxides // *J. Agric. Food Chem.* 2005. V. 53. No. 12. P. 4880–4889. doi: 10.1021/jf0404290
54. Parker D.B., Cai L., Kim K.H., Hales K.E., Spiels M.J., Woodbury B.L., Atkin A.L., Nickerson K.W., Patefield K.D. Reducing odorous VOC emissions from swine manure using soybean peroxidase and peroxides // *Bioresour. Technol.* 2012. V. 124. P. 95–104. doi: 10.1016/j.biortech.2012.08.031
55. Yan Z., Wei X., Yuan Y., Li Z., Li D., Liu X., Gao L. Deodorization of pig manure using lignin peroxidase with different electron acceptors // *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2016. V. 66. No. 4. P. 420–428. doi: 10.1080/10962247.2016.1144660
56. Maurer D.L., Koziel J.A., Bruning K., Parker D.B. Farm-scale testing of soybean peroxidase and calcium peroxide for surficial swine manure treatment and mitigation of odorous VOCs, ammonia and hydrogen sulfide emissions // *Atmos. Environ.* 2017. V. 166. P. 467–478. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.07.048
57. Wu J., Yang J., Wang J., Fang L., Fang J. A field-scale evaluation of the removal of odorous gases by a plant material-based deodorant // *Front. Environ. Sci.* 2023. V. 10. Article No. 1073835. doi: 10.3389/fenvs.2022.1073835
58. Matusiak K., Oleksy M., Borowski S., Nowak A., Korczyński M., Dobrzański Z., Gutarowska B. The use of *Yucca schidigera* and microbial preparation for poultry manure deodorization and hygienization // *J. Environ. Manage.* 2016. V. 170. P. 50–59. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.01.007
59. Varel V.H. Livestock manure odor abatement with plant-derived oils and nitrogen conservation with urease inhibitors: A review // *J. Anim. Sci.* 2002. V. 80. No. E-suppl_2. P. E1–E7. doi: 10.2527/animalsci2002.80E-Suppl_2E1x
60. Suffet I.H., Decottignies V., Zhou Y., Bian Y., Vitko T.G. An evaluation of masking nuisance odors from a source by chemical and sensory analyses // *Water Environ. Res.* 2023. V. 95. No. 7. Article No. e10901. doi: 10.1002/wer.10901
61. Kim K.Y., Ko H.J., Kim H.T., Kim Y.S., Roh Y.M., Lee C.M., Kim C.N. Odor reduction rate in the confinement pig building by spraying various additives // *Bioresour. Technol.* 2008. V. 99. No. 17. P. 8464–8469. doi: 10.1016/j.biortech.2007.12.082
62. Bibbiani C., Russo C. Odour emission from intensive livestock production system: approaches for emission abatement and evaluation of their effectiveness // *Large Anim. Rev.* 2012. No. 18. P. 135–138.
63. Melse R.W., Ogink N.W.M. Air scrubbing techniques for ammonia and odor reduction at livestock operations: review of on-farm research in the Netherlands // *Trans. ASAE.* 2005. V. 48. No. 6. P. 2303–2313. doi: 10.13031/2013.20094
64. Conti C., Tullo E., Bacenetti J., Guarino M. Evaluation of a wet acid scrubber and dry filter abatement technologies in pig barns by dynamic olfactometry // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. No. 7. Article No. 3219. doi: 10.3390/app11073219
65. Costantini M., Bacenetti J., Coppola G., Orsi L., Ganzaroli A., Guarino M. Improvement of human health and environmental costs in the European Union by air scrubbers in intensive pig farming // *J. Cleaner Prod.* 2020. V. 275. Article No. 124007. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124007
66. Hellshtedt M. The use of biochar-peat mixture to reduce odour from animal farms // *Agricultural Machinery and Technologies.* 2019. V. 13. No. 2. P. 27–30. doi: 10.22314/2073-7599-2018-13-2-27-30.
67. Antonious G.F. Biochar and animal manure impact on soil, crop yield and quality // *IntechOpen.* 2018. V. 25. No. 4. P. 45–67. doi: 10.5772/intechopen.77008 [Internet resource] <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.77008> (Accessed: 31.10.2023)
68. Dougherty B., Gray M., Johnson M.G., Kleber M. Can biochar covers reduce emissions from manure lagoons while capturing nutrients? // *J. Environ. Qual.* 2017. V. 46. No. 3. P. 659–666. doi: 10.2134/jeq2016.12.0478
69. Opaliński S., Korczyński M., Szoltyś M., Dobrzański Z., Kołacz R. Application of aluminosilicates for mitigation of ammonia and volatile organic compound emissions from poultry manure // *Open Chem.* 2015. V. 13. P. 967–973. doi: 10.1515/chem-2015-0115
70. Wierzbńska M. The application of mineral sorbents to remove volatile organic compounds from the gases emitted from the composting processes // *J. Ecol. Eng.* 2021. V. 22. No. 2. P. 98–110. doi: 10.12911/22998993/130888

71. Yan Z., Liu X., Yuan Y., Liao Y., Li X. Deodorization study of the swine manure with two yeast strains // *Biotechnol. Bioproc. E.* 2013. V. 18. P. 135–143. doi: 10.1007/s12257-012-0313-x
72. Kim T.I., Ham J.S., Yang C.B., Kim M.K. Deodorization of pig feces by fungal application // *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 2004. V. 17. No. 9. P. 1286–1290. doi: 10.5713/ajas.2004.1286
73. Su Q., Dai D., Liao Y., Han H., Wu J., Ren Z. Synthetic microbial consortia to enhance the biodegradation of compost odor by biotrickling filter // *Bioresour. Technol.* 2023. V. 387. Article No. 129698. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129698
74. Ma Q., Liu S., Li S., Hu J., Tang M., Sun Y. Removal of malodorant skatole by two enriched microbial consortia: performance, dynamic, function prediction and bacteria isolation // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 725. Article No. 138416. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138416
75. Gutarowska B., Matusiak K., Borowski S., Rajkowska A., Brycki B. Removal of odorous compounds from poultry manure by microorganisms on perlite - bentonite carrier // *J. Environ. Manage.* 2014. V. 141. P. 70–76. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.03.017
76. Ma H., Li F., Niyitanga E., Chai X., Wang S., Liu Y. The odor release regularity of livestock and poultry manure and the screening of deodorizing strains // *Microorganisms.* 2021. V. 9. No. 12. Article No. 2488. doi: 10.3390/microorganisms9122488
77. Yan Z., Li J., Liu X., Yuan Y., Liao Y., Li X. Deodorization of swine manure using a *Lactobacillus* strain // *Environ. Eng. Manage. J.* 2017. V. 16. No. 10. P. 2191–2198. doi: 10.30638/eemj.2017.226
78. Ding Y., Xiong J., Zhou B., Wei J., Qian A., Zhang H., Zhu W., Zhu J. Odor removal by and microbial community in the enhanced landfill cover materials containing biochar-added sludge compost under different operating parameters // *Waste Manage.* 2019. V. 87. P. 679–690. doi: 10.1016/j.wasman.2019.03.009
79. Chen W., Yan L., Gao Y., Bao J., Wang Y., Sun Z., Wang W. The removal characteristics and diversity of a microbial community capable of ammonia removal from compost // *Ann. Microbiol.* 2016. V. 66. P. 635–642. doi: 10.1007/s13213-015-1141-y
80. Njalam'mano J.B.J., Chirwa E.M.N., Seabi R.L. *In vitro* study of butyric acid deodorization potential by indigenously constructed bacterial consortia and pure cultures from pit latrine fecal sludge // *Sustainability.* 2020. V. 12. No. 12. Article No. 5156. doi: 10.3390/su12125156
81. Borowski S., Matusiak K., Powałowski S., Pielech-Przybylska K., Makowski K., Nowak A., Rosowski M., Komorowski P., Gutarowska B. A novel microbial-mineral preparation for the removal of offensive odors from poultry manure // *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 2017. V. 119. P. 299–308. doi: 10.1016/j.ibiod.2016.10.042
82. Bondarenko N.B., Kondakova N.V., Starovoytov S.V., Butko D.A. Technology for reducing gas emissions from livestock farms // *RUDN Journal of Ecology and Life Safety.* 2024. V. 32. No. 1. P. 32–40 (in Russian). doi: 10.22363/2313-2310-2024-32-1-32-40
83. Showqi I., Lone F.A., Ashraf M., Mehmood M.A., Rashid A. Biofilters in mitigation of odour pollution – a review // *Nat. Environ. Poll. Tech.* 2016. V. 15. No. 4. P. 1177–1185.
84. Chen L., Hoff S.J. Mitigating odors from agricultural facilities: a review of literature concerning biofilters // *Appl. Eng. Agric.* 2009. V. 25. No. 5. P. 751–766. doi: 10.13031/2013.28854
85. Buelna G., Dubé R., Turgeon N. Pig manure treatment by organic bed biofiltration // *Desalination.* 2008. V. 231. No. 1–3. P. 297–304. doi: 10.1016/j.desal.2007.11.049
86. Reyes J., Toledo M., Michán C., Siles J.A., Alhama J., Martín M.A. Biofiltration of butyric acid: monitoring odor abatement and microbial communities // *Environ. Res.* 2020. V. 190. Article No. 110057. doi: 10.1016/j.envres.2020.110057
87. Singh A., Shareefdeen Z., Ward O.P. Bioscrubber technology // *Biotechnology for odor and air pollution control* / Eds. Z. Shareefdeen, A. Singh. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. P. 169–193. doi: 10.1007/3-540-27007-8_8
88. Le Cloirec P., Humeau P. Bioscrubbers // *Air Pollution Prevention and Control: Bioreactors and Bioenergy* / Eds. C. Kennes, M.C. Veiga. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2013. P. 139–153. doi: 10.1002/9781118523360.ch6
89. Van Groenestijn J.W. Bioscrubbers // *Bioreactors for waste gas treatment* / Eds. C. Kennes, M.C. Veiga. Dordrecht: Springer, 2001. P. 133–162. doi: 10.1007/978-94-007-2439-6_3
90. Vitko T.G., Cowden S., Suffet I.H.M. Evaluation of bioscrubber and biofilter technologies treating wastewater foul air by a new approach of using odor character, odor intensity, and chemical analyses // *Water Res.* 2022. V. 220. Article No. 118691. doi: 10.1016/j.watres.2022.118691
91. Hwang O., Yun Y.M., Trabue S. Impact of *Bacillus subtilis* on manure solids, odor, and microbiome // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 333. Article No. 117390. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117390
92. Huong L.Q., Madsen H., Anh le X., Ngoc P.T., Dalsgaard A. Hygienic aspects of livestock manure management and biogas systems operated by small-scale pig farmers in Vietnam // *Sci. Total Environ.* 2014. V. 470–471. P. 53–57. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.023
93. Holm-Nielsen J.B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization // *Bioresour. Technol.* 2009. V. 100. No. 22. P. 5478–5484. doi: 10.1016/j.biortech.2008.12.046
94. Kovalev A.A. Alternative energy in the Sverdlovsk region // *Energiia: ekonomika, tekhnika, ekologiya.* 2019. No. 9. P. 35–39 (in Russian). doi: 10.7868/S0233361919090040

95. Lesnitchiy V.N., Chetveryk G.A. Hydrodynamic and thermal mode of bioreactor of biogas plant // *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2012. No. 8. P. 56–59 (in Russian).
96. Keck M., Mager K., Weber K., Keller M., Frei M., Steiner B., Schrade S. Odour impact from farms with animal husbandry and biogas facilities // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 645. P. 1432–1443. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.182
97. Vanek M., Mitterpach J., Zacharova A. Odour control in biogas plant. Case study // *Proc. 15th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM. Albena, Bulgaria, June 18–24, 2015. Sofia: STEF92 Technology Ltd., 2015. V. 1. P. 353–360. doi: 10.5593/SGEM2015/B41/17.046*
98. Andriani D., Rajani A., Kusnadi, Santosa A., Saepudin A., Wresta A., Atmaja T.D. A review on biogas purification through hydrogen sulphide removal // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* V. 483. Article No. 012034. doi: 10.1088/1755-1315/483/1/012034
99. Bejan D., Sagitova F., Bunce N.J. Evaluation of electrolysis for oxidative deodorization of hog manure // *J. Appl. Electrochem.* 2005. V. 35. P. 897–902. doi: 10.1007/s10800-005-4722-9
100. Tyagi V.K., Khan A.A., Kazmi A.A., Mehrotra I., Chopra A.K. Slow sand filtration of UASB reactor effluent: a promising post treatment technique // *Desalination.* 2009. V. 249. No. 2. P. 571–576. doi: 10.1016/j.desal.2008.12.049
101. Guchi E. Review on slow sand filtration in removing microbial contamination and particles from drinking water // *American Journal of Food and Nutrition.* 2015. V. 3. No. 2. P. 47–55. doi: 10.12691/ajfn-3-2-3
102. Vanotti M.B., Rice J.M., Ellison A.Q., Hunt P.G., Humenik F.J., Baird C.L. Solid-liquid separation of swine manure with polymer treatment and sand filtration // *Trans. ASAE.* 2005. V. 48. No. 4. P. 1567–1574. doi: 10.13031/2013.19190
103. Healy M.G., Rodgers M., Mulqueen J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters // *Bioresour. Technol.* 2007. V. 98. No. 12. P. 2268–2281. doi: 10.1016/j.biortech.2006.07.036
104. El Bied O., García-Valero A., Fechtali T., Faz Á., Acosta J.A. Purification performance of filtration process for pig slurry using marine sands, silty loam soils, fly ash and zeolite // *Agronomy.* 2021. V. 11. No. 8. Article No. 1608. doi: 10.3390/agronomy11081608
105. Tyndall J., Colletti J. Mitigating swine odor with strategically designed shelterbelt systems: a review // *Agroforest. Syst.* 2007. V. 69. P. 45–65. doi: 10.1007/s10457-006-9017-6
106. Kulshreshtha S., Kort J. External economic benefits and social goods from prairie shelterbelts // *Agroforest. Syst.* 2009. V. 75. No. 1. P. 39–47. doi: 10.1007/s10457-008-9126-5
107. Lin X.J., Barrington S., Nicell J.A., Choinière D., Vézina A. Influence of windbreaks on livestock odour dispersion plume in the field // *Agric. Ecosyst. Environ.* 2006. V. 116. No. 3–4. P. 263–272. doi: 10.1016/j.agee.2006.02.014
108. Lin X.J., Barrington S., Nicell J.A., Choinière D. Effect of natural windbreaks on maximum odour dispersion distance (MODD) // *Can. Biosyst. Eng.* 2007. V. 49. No. 6. P. 624–632.
109. Beckett K.P., Freer-Smith P.H., Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed // *Global Change Biol.* 2000. V. 6. No. 8. P. 995–1003. doi: 10.1046/j.1365-2486.2000.00376.x
110. Agle M., Hristov A.N., Zaman S., Schneider C., Ndegwa P., Vaddella V.K. The effects of ruminally degraded protein on rumen fermentation and ammonia losses from manure in dairy cows // *J. Dairy Sci.* 2010. V. 93. No. 4. P. 1625–1637. doi: 10.3168/jds.2009-2579
111. Karau A., Grayson I. Amino acids in human and animal nutrition // *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 2014. V. 143. P. 189–228. doi: 10.1007/10_2014_269
112. Ojha B.K., Singh P.K., Shrivastava N. Enzymes in the animal feed industry // *Enzymes in Food Biotechnology. Production, Applications, and Future Prospects / Ed. M. Kuddus. Academic Press, 2019. P. 93–109. doi: 10.1016/B978-0-12-813280-7.00007-4*
113. Young M.C., Yun J.C. Regulation of odor gas emission and performance by probiotic *Bacillus* in livestock industry // *Arch. Anim. Poult. Sci.* 2019. No. 1 (2) P. 555–560. doi: 10.19080/AAPS.2019.01.555560
114. Wlazło Ł., Kwiecień M., Bis-Wencel H., Łopuszyński W., Buszewicz G., Karpińska K. Assessment of health safety of pigs taking natural sorbents with feed // *BMC Vet. Res.* 2023. Article No. 19. doi: 10.1186/s12917-022-03563-3
115. Hayes E.T., Leek A.B.G., Curran T.P., Dodd V.A., Carton O.T., Beattie V.E., O'Doherty J.V. The influence of diet crude protein level on odour and ammonia emissions from finishing pig houses // *Bioresour. Technol.* 2004. V. 91. No. 3. P. 309–315. doi: 10.1016/S0960-8524(03)00184-6
116. Wesoly R., Weiler U. Nutritional influences on skatole formation and skatole metabolism in the pig // *Animals.* 2012. V. 2. No. 2. P. 221–242. doi: 10.3390/ani2020221
117. Choi W., Lee W., Kim K. Odor generation pattern of swine manure according to the processing form of feed // *J. Anim. Sci. Technol.* 2024. V. 66. No. 1. P. 219–231. doi: 10.5187/jast.2023.e48