

Проблемы устранения запахового загрязнения окружающей среды побочными продуктами птицеводства (обзор)

© 2025. Н. В. Сырчина¹, к. х. н., с. н. с.,

Т. Я. Ашихмина^{1, 2}, д. т. н., г. н. с., зав. лабораторией,

М. Х. Хето¹, аспирант,

¹Вятский государственный университет,

610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения

Российской академии наук,

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

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

Функционирование современных птицеводческих предприятий сопровождается образованием значительного количества побочных продуктов, к числу которых относится куриный помёт (КП). Накопление помёта вблизи птицефабрик вызывает запаховое загрязнение сельских территорий. Запахообразующие вещества (ЗОВ) образуются в процессе метаболизма непереваренных остатков корма разнообразными микроорганизмами, попадающими в помёт из кишечника кур и внешней среды. Основной вклад в формирование запаха вносят короткоцепочечные жирные кислоты, летучие соединения серы (H_2S , тиоспирты, тиоэфиры и др.) и азота (NH_3 , биогенные амины и др.). В свежем КП доминируют такие бактерии, как Firmicutes, Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria, а также грибы *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*. В процессе хранения или компостирования состав микробиоты существенно изменяется, в частности снижается количество Firmicutes и возрастает количество Actinobacteria. Трансформация микробного сообщества сопровождается изменением запаха. Наиболее интенсивным запахом обладает свежий помёт. В настоящее время проводятся активные исследования, направленные на разработку методов дезодорации КП. Большой практический интерес вызывают методы, предполагающие применение микробиологических препаратов, регуляторов кислотности, натуральных сорбентов. Используемые в качестве дезодорантов материалы подавляют продуцирующую ЗОВ гнилостную микробиоту или устраняют неприятный запах за счёт деструкции, иммобилизации, маскировки ЗОВ. В условиях промышленной переработки КП в товарные формы удобрений более удобны химические и физико-химические методы дезодорации. К значительному снижению запаха КП приводит сочетанное воздействие извести (химический реагент) и глауконита (сорбент) с последующим высушиванием смеси. К недостаткам соответствующего метода следует отнести значительные потери азота (в форме NH_3) при разложении солей аммония в щелочной среде. Для предотвращения эмиссии NH_3 в атмосферу можно использовать технологию поглощения этого газа раствором кислоты (например, серной). Образующийся при этом сульфат аммония может найти применение в качестве азотного удобрения.

Ключевые слова: куриный помёт, запах, микробиота кишечника, микробиота помёта, удобрения, дезодорация помёта.

Current issues of eliminating odor pollution of the environment by poultry by-products: a review

© 2025. N. V. Syrchina¹

T. Ya. Ashikhmina^{1, 2}

M. H. Kheto¹

ORCID: 0000-0001-8049-6760^{*}

ORCID: 0000-0003-4919-0047^{*}

ORCID: 0009-0001-7138-4203^{*}

¹Vyatka State University,

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

²Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch

of the Russian Academy of Sciences,

28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,

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

acids, volatile sulfur compounds (H_2S , thioalcohols, thioethers, etc.) and nitrogen (NH_3 , biogenic amines, etc.) make the main contribution to odor formation. Such bacteria as Firmicutes, Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria, as well as fungi *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* dominate in fresh CM. The microbiota composition changes significantly during storage or composting. In particular, the number of Firmicutes decreases and the number of Actinobacteria increases. The microbial community transformation is accompanied by a change in odor. Fresh CM have the most intense odor. Active research is underway to develop methods to deodorize CM. Methods involving the use of microbiological preparations, acidity regulators, and natural sorbents are of greater practical interest. Materials used as deodorants inhibit OFS-producing putrefactive microbiota or eliminate odor by destroying, immobilizing, and masking of OFS. Chemical and physical-chemical methods of deodorization are more convenient for industrial processing of CM into commercial forms of fertilizers. The combined effect of lime (a chemical reagent) and glauconite (a sorbent) followed by drying the mixture leads to a significant reduction of CM odor. The disadvantages of this method include significant losses of nitrogen (in the form of NH_3) during the decomposition of ammonium salts in an alkaline medium. To prevent the NH_3 emission into the atmosphere, it is possible to use the technology of absorption of this gas by an acid solution (for example, sulfuric acid). The ammonium sulfate formed in this way can be used as a nitrogen fertilizer.

Keywords: chicken manure, odor, intestinal microbiota, manure microbiota, fertilizers, manure deodorization.

Производство основной птицеводческой продукции (яиц, мяса) сопровождается образованием значительного количества побочных продуктов, к числу которых относится куриный помёт (КП). На каждый килограмм куриного мяса дополнительно образуется до трёх и более килограмм помёта. Ежедневный выход КП, в зависимости от возраста и группы птицы, варьирует от 175 до 300 г на одну голову (в расчёте на влажность 71–73%) [1]. По имеющимся оценкам, от одной птицефабрики средней мощности (40 тыс. кур несушек или 10 млн цыплят бройлеров) ежегодно поступает от 35 до 83 тыс. т помётной массы. В отсутствие эффективных систем утилизации неиспользуемые объёмы помёта накапливаются вблизи птицеводческих предприятий, что создаёт серьёзную опасность для людей и окружающей среды (ОС) [2]. Особое раздражение населения вызывает крайне неприятный запах, распространяющийся на значительные расстояния от мест складирования и обработки соответствующего побочного продукта. Многие запахообразующие вещества (ЗОВ), источником которых является КП, оказывают непосредственное негативное влияние на здоровье человека. Такие компоненты запаха, как арсин, диметилсульфат, гидразин, метилгидразин позиционируют как потенциальные канцерогены. В исследованиях [3] выявлено, что у людей, живущих вблизи заводов по переработке кур, симптомы рака, хронического бронхита, эмфиземы и заболеваний сердца диагностируются значительно чаще среднего уровня по стране. В связи с активным развитием промышленного птицеводства проблема запахового загрязнения сельских территорий всё более обостряется, а поиск технологических решений, позволяющих снизить эмиссию ЗОВ, приобретает особую актуальность и практическую значимость.

Цель работы – систематизировать, обобщить и критически оценить достижения мировой науки и технологии в решении проблемы устранения запахового загрязнения окружающей среды побочными продуктами птицеводства.

Объекты и методы исследования

Статья представляет собой обзор научной и технической информации, посвящённой проблеме запаха КП. В обзор включены результаты научных исследований, опубликованные в период с 2000 по 2025 гг. Поиск информации осуществляли с помощью сервисов Google Scholar, Scopus, Web of Science, Академия Google, eLIBRARY, КиберЛенинка, «Scholar.ru», ИС «Поисковая платформа» Роспатента. Для лингвистического моделирования предметного поля использовали следующие поисковые запросы: куриный помёт, побочные продукты животноводства, запах куриного помёта, методы устранения запаха, дезодорация биогенных отходов, а также ключевые слова, приведённые в научных статьях аналогичной тематики. Ключевые слова использовали в англоязычном и русскоязычном вариантах с корректировкой лексического значения терминов. Электронный поиск в международных и национальных базах данных дополняли ручным поиском релевантной информации в книгах, ведущих научных и отраслевых журналах, реферативном журнале (РЖ) ВИНТИ РАН, библиографических списках, материалах конференций и других изданиях. Основное внимание уделено таким вопросам, как состав и условия формирования запаха, способы устранения запаха, дезодорирующие материалы для КП, экологические и экономические аспекты внедрения технологий устранения запаха в практику.

Химический состав куриного помёта

Основу питания кур составляют растительные рационы, обогащаемые дефицитными аминокислотами, минералами, витаминами, ферментами, пребиотиками, пробиотиками и антибиотиками, способствующими улучшению показателей роста и продуктивности [4, 5]. В процессе пищеварения птицы усваивают менее 50% питательных веществ рациона. Непереваренный остаток выводится из организма в виде помёта. На состав помёта заметное влияние оказывают особенности кормления, возраст, производственное назначение птицы, технология содержания, устройство водоподачи, способ удаления и хранения экскрементов [6, 7], в связи с этим сведения о содержании в КП отдельных компонентов, приводимые в разных источниках, могут существенно различаться. Для КП характерно высокое содержание азота, серы и фосфора, что обусловлено особенностями пищеварения птиц, а также сложившейся практикой «перекармливания» кур для максимально быстрого набора массы тела [8]. Основная доля неусвоенного азота экскретируется у птиц в виде непереваренных белков, мочевой кислоты и мочевины. Содержание азотистых соединений в КП достигает 26–38%. Сера содержится в белках и сульфатах. Массовая доля серы обычно составляет 0,4–0,6% от массы сухого вещества КП [9]. Фосфор входит в состав плохо усваиваемых в организме кур фитатов, а также некоторых других органических соединений (нуклеотидов, нуклеиновых кислот, фосфолипидов, эфиров фосфорной кислоты). Около 30% фосфора выводится из организма птиц в минеральной форме [10, 11]. Высокое содержание непереваренных фитатов обусловлено низкой выработкой фермента фитазы. Соответствующий фермент играет ключевую роль в гидролизе моноэфиров фосфорной кислоты [12]. Содержание калия в КП обычно составляет 1,8–3,1%; натрия – 0,5–1,5%; магния – 0,8–1,4%. Кроме макроэлементов КП содержит практически все микроэлементы, включая медь – 0,003–0,009%; железо – 0,01–0,04%; цинк – 0,004–0,06%; марганец – 0,005–0,01%, а также витамины В12, Е, Д, К, рибофлавин, пиридоксин, никотиновую кислоту, каротин [13, 14]. Водородный показатель (рН) КП близок к нейтральным значениям или чуть выше (7–8). Электропроводность варьирует в пределах от 250 до 1230 мСм/м и зависит от массовой доли растворимых солей [15].

Химический состав и свойства КП обеспечивают благоприятные условия для жизнедеятельности разнообразных микроорганизмов-деструкторов, метаболизирующих сложные органические соединения до более простых форм, многие из которых имеют неприятный запах.

Микробиом кишечника кур и его роль в формировании запаха

Желудочно-кишечный тракт кур заселён сложными микробными сообществами, включающими бактерии, грибы, археи, простейшие, вирусы [16]. Наиболее многочисленными являются бактерии, относящиеся к таким таксонам, как Firmicutes, Proteobacteria и Bacteroidetes [17, 18]. В пределах типа Firmicutes наиболее многочисленными являются роды *Clostridium*, *Ruminococcus*, *Lactobacillus*, *Eubacterium*, *Fecalibacterium*, *Butyrivibrio*, *Ethanoligenens*, *Alkaliphillus*, *Butyricicoccus*, *Blautia*, *Hespellia*, *Roseburia* и *Megamonas*, в типе Bacteroidetes – роды *Bacteroides*, *Prevotella*, *Parabacteroides* и *Alistipes* [19]. Состав микробиома существенно зависит от характера рациона и производственной группы птицы. Согласно [20], в кишечнике бройлеров широко представлены *Lactobacillus*, *Enterococcus* (оба рода относятся к типу Firmicutes), *Bacteroides* (тип Bacteroidetes) и *Corynebacterium* (тип Actinobacteria). В кишечном микробиоме кур-несушек наиболее часто встречаются *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Eubacterium*, *Bacteroides*, *Escherichia coli*, *Prevotella*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Megasphaera*, *Fusobacterium* и *Bifidobacterium*.

Самые плотные популяции микроорганизмов (МО) характерны для слепой кишки (кишечник кур содержит 2 слепых отростка), а наименее плотные – для проксимального отдела тонкого кишечника. В микробиоме слепой кишки представлено до 1000 различных видов, принадлежащих к таким типам как Firmicutes, Bacteroidetes, Actinobacteria, Proteobacteria. Два первых типа занимают доминирующее положение (до 90% от общей численности МО). Микробиота толстой кишки формируется за счёт МО, попадающих в этот отдел из слепых отростков и подвздошной кишки [21].

Кроме бактерий в микробиоме кур идентифицировано 88 различных видов грибов, включая *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp. и *Sporidiobolus* spp. [22]. Доминирующее положение занимают представители типов

Ascomycota и Basidiomycota. Наиболее распространённые роды – *Microascus*, *Gibberella*, *Trichosporon*, *Aspergillus*, а также *Candida* и *Fusarium pseudonygamai*. Грибное сообщество, по сравнению с бактериальным, играет в пищеварении кур второстепенную роль [23, 24].

Анаэробные МО кишечника принимают активное участие в метаболизме поступающих с кормом белков и углеводов, в результате чего образуется значительное количество ЗОВ [25]. Ферментация белков анаэробными бактериями в слепых отростках приводит к накоплению биогенных аминов (путресцина, спермидина, спермина и др.), индолов, фенолов, крезолов, аммиака [26]. В процессе микробиологической ферментации неперевариваемых углеводов образуются короткоцепочечные жирные кислоты (КЦЖК). Согласно результатам выполненных исследований, ацетат, пропионат и бутират являются основными метаболитическими продуктами микробиома птицы [27].

Влияние микробиоты на запах куриного помёта

Населяющие помёт микроорганизмы (МО) играют ключевую роль в формировании характерного неприятного запаха (НЗ). Основу микробиоты КП составляют МО кишечника, способные адаптироваться к условиям внешней среды, а также МО подстилки. В свежем КП доминируют такие бактерии, как Firmicutes, Proteobacteria, Bacteroidetes, Actinobacteria [28, 29], а также грибы *Mucor*, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* [30]. Наибольшей численностью и разнообразием отличаются грамположительные бактерии. В процессе хранения или компостирования помёта состав микробиоты существенно изменяется, в частности снижается количество Firmicutes и возрастает количество Actinobacteria [31]. Трансформация микробиоты сопровождается изменением запаха. Наиболее интенсивное выделение NH_3 , H_2S и других летучих органических соединений (ЛОС) происходит из свежего КП, по мере хранения интенсивность запаха снижается [32]. Большое влияние на запах оказывает подстилка, представляющая собой смесь того или иного подстилающего материала (опилок, соломы, сена, торфа, хвои, песка, стружек и др.) с помётом, перьями, остатками корма, кормовых добавок, ветеринарных препаратов, воды [33]. В подстилке могут обитать разнообразные, в том числе патогенные вирусы, бактерии, грибы, простейшие, гельминты, образующие

сложноорганизованные сообщества [34]. Формирование характерного запаха КП в значительной мере связано с бактериями типа Firmicutes (особенно *Bacillus*, *Enterococcus* и *Oceanobacillus*), которые способны секретировать большое количество внеклеточных ферментов, играющих важную роль в деградации белков. Особую опасность представляет NH_3 , выделяющийся при разложении содержащихся в КП азотистых соединений, прежде всего мочевой кислоты и мочевины [35–38].

Среднесуточный выброс NH_3 достигает 130 мг на одну курицу [39]. Повышенное содержание этого газа в воздухе (>25 ppm) приводит не только к запаховому загрязнению, но и к снижению прироста массы тела, выживаемости, иммунитета, ухудшению конверсии корма, увеличению количества погибших птиц [40]. Уровень эмиссии NH_3 из КП зависит от температуры, влажности, вентиляции, возраста птиц, типа подстилки и даже сезона. Ферменты, участвующие в разложении мочевой кислоты и мочевины до NH_3 , широко распространены в природе, поскольку вырабатываются самыми разными группами организмов: животными, растениями, бактериями, грибами [41]. Ключевую роль в общем процессе минерализации азота играют уриказы (ферменты, разлагающие мочевую кислоту) и уреазы (ферменты, разлагающие мочевину) [42, 43]. Продуцентами соответствующих ферментов в КП являются обитающие к нём МО. Уриказы проявляют высокую стабильность в широком интервале pH (5–10) и температур (25–55 °C). Даже нагревание до 70 °C в течение 30 минут не приводит к их инактивации [44, 45]. Нейтральные уреазы, вырабатываемые большинством МО, проявляют максимальную активность при pH 7,0–8,0. Кислые уреазы разлагают мочевину в кислой среде (2,0–4,5) [46, 47]. Активность уреаз возрастает при повышении температуры в интервале 25–55 °C. Увеличение температуры до 60–65 °C сопровождается некоторым снижением их активности. Более сильное нагревание приводит к разрушению белковой структуры и инактивации фермента [48].

Важный вклад в НЗ вносит не только NH_3 , но и другие летучие азотсодержащие соединения, в частности биогенные амины. Декарбоксилазная активность, приводящая к образованию соответствующих соединений, характерна для попадающих в КП из кишечника птиц и внешней среды *Listeria*, *Salmonella*, *Klebsiella*, *Enterococcus*, *Escherichia*, *Bacillus*, *Morganella*, *Enterobacter*, *Photo-*

bacterium, *Shewanella*, *Vibrio*, *Staphylococcus*, а также некоторых штаммов молочнокислых бактерий: *Lactobacillus fuchuensis*, *Lactococcus piscium*, *Leuconostoc gelidum* и *Carnobacterium alterfunditum*. Гены, связанные с образованием путресцина, переносятся *Escherichia coli*, *Enterobacter cloacae* и *Citrobacter* sp. Важный вклад в образование кадаверина и тирамина вносят *Escherichia coli* и *Klebsiella oxytoca*. Бактерии, обладающие декарбоксилазной активностью, обитают не только в кишечнике, но и на поверхности кожи птицы. К числу таких бактерий относятся представители семейства Enterobacteriaceae (включая *Escherichia coli*, *Pantora* spp., *Serratia marcescens*, *Serratia ligefaciens*, *Serratia* spp., *Proteus vulgaris*, *Klebsiella oxytoca*, *Klebsiella* spp., *Yersinia enterocolitica*), а также штаммы из родов *Aeromonas* spp. и *Pseudomonas* [49–51]. В составе непереваренных остатков пищи, пуха и перьев данные бактерии попадают в КП, где продолжают метаболизировать сложные азотсодержащие соединения до более простых летучих форм.

Эмиссия H_2S , тиолов, тиоэфиров, дисульфидов, трисульфидов, карбонилсульфида, сероуглерода обусловлена анаэробным микробиологическим разложением органических серосодержащих соединений (прежде всего белков). Активное участие в этом процессе принимают *Weissella*, *Leuconostoc*, *Peptococcus*, *Bacteroides*, *Peptoniphilus* [52]. Из всех сероорганических соединений наибольшее влияние на характер запаха оказывает метантиол (метилмеркаптан). Образование соответствующего соединения происходит в процессе анаэробной дегградации цистеина и метионина. Важную роль в продуцировании метантиола играют бактерии рода *Bacillus*. [53]. Следует иметь в виду, что уровень эмиссии серосодержащих ЗОВ из КП может повышаться за счёт восстановления содержащихся в биогенных отходах сульфатов сульфатредуцирующими прокариотами [54–56].

Активное продуцирование КЦЖК в процессе метаболизма пищевых волокон характерно для *Bacteroides* (в частности, *B. theta-iotaomicron*, *B. ovatus*), *Prevotella*, *Fibrobacter*, *Roseburia*, *Fusobacterium* и др. [57, 58]. К ацидогенным бактериям можно также отнести *Bacillus* и *Clostridium* [59].

В разложении лигноцеллюлозы непосредственное участие принимают грибы (*Penicillium expansum*, *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride* и др.) [60].

Создание условий для подавления численности одних групп МО и стимулирования

других позволяет в значительной степени модифицировать интенсивность и характер запаха [61, 62]. Согласно опубликованным данным, обработка КП препаратами, содержащими комплекс *Pseudomonas fluorescens*, *Enterococcus faecium*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus megaterium*, *Leuconostoc mesenteroides* и *Lactobacillus plantarum*, способствует снижению эмиссии NH_3 и H_2S [63]. Инокулят на основе *Bacillus* оказывает влияние на состав и численность бактериальных и грибных сообществ, в результате чего уменьшаются выбросы NH_3 , но повышаются выбросы H_2S [64]. Инокуляция КП иммобилизованными сероокисляющими бактериями способствует снижению эмиссии H_2S [65]. Сравнительная оценка возможности использования различных МО для удаления таких компонентов запаха, как H_2S , NH_3 , летучие жирные кислоты (ЛЖК), показала, что наилучшие результаты в этом отношении демонстрируют представители родов *Bacillus* и *Pseudomonas*, в частности *Bacillus licheniformis*, *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* и *Pseudomonas* sp., а также актиномицеты рода *Streptomyces*. Грамотрицательные бактерии *Flavobacterium* и *Achromobacter* принимают участие в удалении сульфидов, дрожжи *Candida inconspicua* и молочнокислые бактерии *Leuconostoc mesenteroides* достаточно активно метаболизируют аммонийный азот. На метаболизм КЦЖК заметное влияние оказывают *Bacillus* и *Pseudomonas*, а также *Flavobacterium* и *Staphylococcus lentus* [66].

Запах куриного помёта

Запах КП обусловлен эмиссией различных летучих соединений, образовавшихся в организме птицы в процессе пищеварения, а также в результате деструкции непереваренных компонентов пищи во внешней среде. На характер и интенсивность запаха оказывают влияние не только особенности рациона птиц и условия хранения помёта, но и порода кур [67]. Основной вклад в формирование запаха вносят летучие соединения серы (H_2S , тиоспирты, тиоэфиры и др.), азота (NH_3 , биогенные амины и др.) и кислорода (ЛЖК, спирты, кетоны, фенолы и др.) [68, 69]. Соединения фосфора не оказывают существенного влияния на запах, однако в ряде публикаций в качестве компонента запаха КП отмечают токсичный газ фосфин [70, 71]. Технический фосфин имеет крайне неприятный запах, напоминающий запах тухлой рыбы или чеснока. Соответствующее соединение отличается высо-

Таблица 1 / Table 1

Основные компоненты запаха куриного помета / The main components of the chicken manure odor

Вещество / Substance	Характер запаха / Odor character	Порог восприятия, ppm (объёмные) [72] Perception threshold, ppm (volumetric) [72]
Кислородосодержащие соединения / Oxygen-containing compounds		
Метанол / Methanol	Алкольный / Alcoholic	33
Этанол / Ethanol		0,52
Пропанол / Propanol		0,094
n-Бутанол / n-Butanol	Неприятный, резкий, запах сивуш- ного масла / Unpleasant, pungent, fusel oil odor	0,038
Изоамиловый спирт Isoamyl alcohol	Неприятный, навязчивый / Unple- asant, intrusive	0,0017
Геосмин / Geosmin	Землистый / Earthy	0,0000065
Муравьиная кислота Formic acid	Резкий, кислый / Pungent, sour	1–640 мг/м ³ / mg/m ³ [73]
Уксусная кислота Acetic acid		0,0060
Пропионовая кислота Propionic acid		0,0057
Масляная кислота Butyric acid	Резкий запах прогорклого масла Pungent odor of rancid oil	0,00019
Изомасляная кислота Isobutyric acid	Неприятный / прогорклый Unpleasant / rancid	0,0015
Валерьяновая кислота Valerian acid	Очень неприятный, тухлый / Very unpleasant, rotten	0,000037
Изовалериановая кислота Isovaleric acid	Очень неприятный, запах пота, за- пах старых носков / Very unpleas- ant, sweat odor, old socks odor	0,000078
Фенол / Phenol	Неприятный, химический, тошно- творно-сладкий / Unpleasant, chemi- cal, sickly-sweet	0,0056
Ацетон / Acetone	Неприятный, резкий, химический Unpleasant, pungent, chemical	42
Бутанон / Butanone	Напоминает запах ацетона / It smells like acetone	0,44
Ацетоин / Acetoin	Выраженный запах сливочного мас- ла или жирной сметаны / Strong odor of butter or heavy cream	6–50 ppm [74]
Диацетил / Diacetyl	Сильный жирный запах сливоч- ного масла, сметаны, прогорклый Strong fatty odor of butter, sour cream, rancid	0,000050
Акролеин / Acrolein	Едкий, неприятный запах подго- релого жира / Pungent, unpleasant odor of burnt fat	0,0036
Серосодержащие соединения / Sulfur-containing compounds		
Сероводород Hydrogen sulfide	Запах тухлых яиц / The odor of rot- ten eggs	0,00041
Метилмеркаптан Methyl Mercaptan	Резкий неприятный, напоминает запах гнилой капусты или тухлых яиц / Pungent, unpleasant, reminis- cent of the odor of rotten cabbage or rotten eggs	0,000070

Вещество / Substance	Характер запаха / Odor character	Порог восприятия, ppm (объёмные) [72] Perception threshold, ppm (volumetric) [72]
Этилмеркаптан Ethyl Mercaptan	Очень неприятный, запах скунса Very unpleasant, skunk odor	0,0000087
n-Пропилмеркаптан n-Propyl Mercaptan	Запах гнилой капусты, гнилого лука / The odor of rotten cabbage, rotten onions	0,000013
Диметилтрисульфид Dimethyltrisulfide	Неприятный, едкий, напоминает запах морепродуктов, варёной капусты, свёклы, лука / Unpleasant, pungent, reminiscent of the odor of seafood, boiled cabbage, beetroot, onion	0,06–8,8 мкг/м ³ / µg/m ³ [75]
Диметилсульфид Dimethyl Sulfide		0,0030
Диметилдисульфид Dimethyl disulfide	Запах резины, гнилого чеснока или лука / Odor of rubber, rotten garlic or onions	0,0020
Азотсодержащие соединения / Nitrogen-containing compounds		
Аммиак / Ammonia	Очень резкий, неприятный / Very pungent, unpleasant	1,5
Метиламин Methylamine	Неприятный, запах рыбы, аммиака Unpleasant, odor of fish, ammonia	0,035
Диметиламин Dimethylamine	Неприятный, запах рыбы, аммиака / Unpleasant, odor of fish, ammonia	0,033
Триметиламин Trimethylamine	Фекальный, рыбный / Fecal, fishy	0,000032
Индол / Indole	Фекальный / Fecal	0,00030
Скатол / Skatole	Фекальный, гнилостный / Fecal, putrid	0,0000056
Пиридин / Pyridine	Резкий, неприятный, напоминает запах испорченной рыбы / Pungent, unpleasant, reminiscent of the odor of spoiled fish	0,063

кой химической активностью и на воздухе самовоспламеняется, что затрудняет его идентификацию в продуктах биотрансформации КП.

В настоящее время идентифицировано более 150 летучих соединений, формирующих запах КП. Данные об основных компонентах запаха приведены в таблице 1.

Дезодорация куриного помёта

Устранение запаха имеет большое значение для обеспечения благоприятных условий работы персонала птицефабрик, улучшения экологической обстановки прилегающих к птицеводческим предприятиям территорий, оптимизации органолептических характеристик помёта, предназначенного для переработки в удобрения. Согласно зарубежным публикациям, запах КП, реализуемого в качестве органического удобрения, оказывает существенное влияние на формирование по-

требительского спроса. Потребители предпочитают землистый запах, который обусловлен накоплением в органических удобрениях геосмина. Геосмин и родственные ему ЛОС продуцируются актиномицетами и цианобактериями в процессе компостирования КП или навоза [76]. Компостирование позволяет не только устранить НЗ, но и значительно улучшить санитарно-гигиенические характеристики КП, однако этот процесс протекает довольно медленно, требует соблюдения определённого температурного режима и значительных площадей для размещения компостируемого материала. Ускорить процесс можно за счёт обработки КП специализированными микробиологическими препаратами (ЭМ-препаратами), содержащими определённые штаммы микроорганизмов-деструкторов [77, 78]. Несмотря на экологичность и эффективность, существующие ЭМ-технологии не позволяют сократить время обработки КП

до приемлемого на промышленных предприятиях уровня. Кроме того, компостирование приводит к значительным потерям наиболее ценного компонента КП – азота [79].

В условиях промышленной переработки КП в товарные формы удобрений более удобны химические и физико-химические методы дезодорации. Основными преимуществами соответствующих методов являются производственная технологичность (приспособленность к производству) и высокая скорость достижения требуемого результата. К недостаткам следует отнести ограниченный перечень пригодных для обработки КП экологически безопасных дезодорирующих материалов и дополнительные затраты на их приобретение; отсутствие универсальных дезодорантов, способных устранять широкий перечень различных по химической природе ЗОВ; значительный расход дезодорирующих добавок; непродолжительный период действия и (в большинстве случаев) необходимость повторных обработок, что обусловлено быстрым восстановлением гнилостной микробиоты в богатой питательными веществами среде [80, 81]. Несмотря на данные недостатки, интерес к поиску эффективных дезодорирующих материалов и композиций не исчезает. В разных странах проводятся исследования по оценке перспектив применения известняка, гипса, цеолита, антибиотиков, перманганата калия, перекиси водорода, хлора, гипохлоритов, кислот (серной, фосфорной, органических), формальдегида, сапонинов юкки, сульфата цинка, ферментов и др. для снижения запаха навоза и помёта [82–85]. Используемые в качестве дезодорантов материалы подавляют продуцирующую ЗОВ гнилостную микробиоту или устраняют НЗ за счёт деструкции, иммобилизации, маскировки ЗОВ. Для снижения активности или устранения гнилостной микробиоты обычно применяют реагенты, проявляющие бактерицидные или бактериостатические свойства, а также регуляторы кислотности [86]. Бактерицидные препараты уничтожают бактерии, бактериостатические – подавляют их рост. Регуляторы кислотности способствуют смещению рН в неблагоприятную для жизнедеятельности МО область (слишком кислую или слишком щелочную), что приводит к замедлению процессов деструкции органических веществ, в результате чего уровень эмиссии ЗОВ снижается.

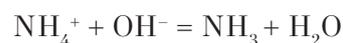
Для подкисления побочных продуктов животноводства обычно используют органические или минеральные кислоты, а также соли Al(III)

и Fe(III). Применение органических кислот или солей сопряжено с меньшими рисками для ОС и персонала предприятий, однако является весьма затратным. Более бюджетный вариант ориентирован на применение минеральных кислот, в частности H_2SO_4 (дешёвая, нелетучая, сильная) [87–89]. Основным недостатком H_2SO_4 , как реагента для обработки побочных продуктов животноводства, является высокая химическая агрессивность, что существенно сдерживает внедрение технологии подкисления в практику животноводства. Для подщелачивания КП чаще всего используется негашёная CaO или гашёная $Ca(OH)_2$ известь [90, 91].

Реакция среды (рН) помёта является важным фактором, регулирующим эмиссию NH_3 , летучих органических кислот (ЛОК), H_2S , а также меркаптанов и тиоэфиров [92]. С одной стороны рН влияет на активность микробиоты и ферментов, расщепляющих органические вещества с образованием летучих соединений, с другой – определяет возможность перехода некоторых ЗОВ в нелетучие формы:



Для кислой среды характерно наличие дурнопахнущих H_2S и ЛОК, в щелочной среде эти соединения образуют нелетучие соли и запах уменьшается. При рН 9 практически весь H_2S переходит в нелетучие формы (сульфиды, гидросульфиды). Есть данные, что высокий уровень рН способствует иммобилизации не только H_2S , но и, вероятно, тиоспиртов и тиоэфиров [93]. Вместе с тем в щелочной среде резко усиливается эмиссия NH_3 , что обусловлено протеканием реакции:



При рН около 11 практически весь аммонийный азот переходит в газообразную форму – NH_3 .

Если за счёт подкисления или подщелачивания удаётся сместить рН в неблагоприятную для гнилостных МО область, то летучие вещества постепенно удаляются (выветриваются) из КП, а новые не образуются. В результате запах снижается. В практическом птицеводстве для контроля запаха может найти применение как способ подкисления, так и способ подщелачивания [94–96].

Таблица 2 / Table 2

Влияние добавок на запах куриного помёта / The effect of additives on the chicken manure odor

Дезодорирующий агент Deodorizing agent	Результат / Result	Преимущества Advantages	Недостатки Disadvantages
Активированный уголь, силикагель / Activated carbon, silica gel [98]	Запах снижается, но полного устранения или улучшения гедонического тона запаха достигнуть не удаётся, в основном из-за интенсивной эмиссии NH ₃ / The odor is reduced, but complete elimination or improvement of the hedonic odor tone cannot be achieved, mainly due to the intense NH ₃ emission	Безопасность Safety	Высокая стоимость реагентов High cost of reagents
1) Суперфосфат Superphosphat 2) Суперфосфат + MgSO ₄ Superphosphate + MgSO ₄ 3) Суперфосфат + биоуголь + MgSO ₄ / Superphosphate + biochar + MgSO ₄ [99]	1) Снижение эмиссии серосодержащих ЗОВ Reduction of sulphur-containing OFS emission 2) Снижение эмиссии NH ₃ и серосодержащих ЗОВ Reduction of emission of NH ₃ and sulphur-containing OFS 3) Существенное подавление запаха за счёт связывания NH ₃ и серосодержащих ЗОВ Significant odor suppression due to binding of NH ₃ and sulphur-containing OFS	Обогащение КП фосфором Enrichment of CM with phosphorus	Высокая стоимость реагентов / High cost of reagents
Биоуголь / Biochar [100]	Снижение эмиссии серосодержащих ЗОВ Reduction of emissions of sulphur-containing OFS	Безопасность Safety	Недостаточная эффективность Insufficient efficiency
Биоуголь / Biochar [101]	Снижение эмиссии широкого спектра ЛОС / Reduction of a wide range of VOCs emissions		
Активированный уголь, силикагель и цеолит Activated carbon, silica gel and zeolite [102]	Снижение эмиссии ЗОВ при сохранении гедонистического тона запаха. Активированный уголь и силикагель более эффективны, чем цеолит Reducing OFS emissions while maintaining the hedonistic odor tone. Activated carbon and silica gel are more effective than zeolite	Безопасность Safety	Высокая стоимость реагентов. Низкая эффективность High cost of reagents. Low efficiency
Биоуголь и биоуголь в сочетании с MgO / Biochar and biochar combined with MgO [103]	Снижение эмиссии NH ₃ и ЛОС в компосте из КП / Reduction of NH ₃ and VOCs emissions in CM compost		Невысокая эффективность Low efficiency
Клиноптилит / Clinoptilite [104]	Увеличение эмиссии NH ₃ , запах не устраняется / Increased NH ₃ emissions, odor persist		Отсутствие эффекта / Low efficiency
Глауконит / Glaucosite [105]	Полное удаление запаха при добавлении в КП 2% глауконита Complete removal of odor by adding 2% glaucosite to the CM	Обогащение КП калием Enrichment of CM with potassium	Эффект не подтверждён результатами других исследований The effect has not been confirmed by the results of other studies

Дезодорирующий агент Deodorizing agent	Результат / Result	Преимущества Advantages	Недостатки Disadvantages
CaO (1% от содержания влаги в КП до рН 6,5–6,8) + глауконит (10% от массы КП) / CaO (1% of the moisture content in the CM up to рН 6.5–6.8) + glauconite (10% of the CM mass) [106]	Снижение запаха Odor reduction	Обогащение КП калием и кальцием Enrichment of CM with potassium and calcium	Потеря аммонийного азота, необходимость связывать выделяющийся NH ₃ / Loss of ammonium nitrogen, the need to bind released NH ₃
Гашёная известь + глауконит / Slaked lime + glauconite [107]	Устранение резкого запаха Elimination of pungent odor		
Добавка компоста из КП в норме 30–50% от массы сухого вещества в смеси / Addition of CM compost at a rate of 30–50% of the dry matter weight in the mixture [108]	Снижение запаха Odor reduction	Безопасность Safety	Необходимость приготовления компоста / The need for compost preparation
Цеолит / Zeolite [109]	Неприятный запах не исчезал и даже усиливался / The unpleasant odor did not disappear and even intensified	Безопасность Safety	Низкая эффективность, высокий расход Low efficiency, high consumption
Цеолит (нанесение на поверхность КП) / Zeolite (applied to the CM surface) [110]	Снижение неприятного запаха Reducing unpleasant odor		

Примечание: КП – куриный помёт, ЗОВ – запахообразующие вещества, ЛОС – летучие органические соединения.
Note: CM – chicken manure, OFS – odor-forming substances, VOCs – volatile organic compounds.

Снижению активности гнилостной микрофлоры способствует и высушивание КП. Согласно опубликованным данным, НЗ высушенного КП снижается до 65,3–69,3% [97]. К преимуществам метода можно отнести снижение массы высушенного КП и расходов на его транспортировку, улучшение микробиологических характеристик, уменьшение потерь азота, увеличение сроков хранения. К недостаткам – высокое энергопотребление и интенсивная эмиссия ЗОВ в процессе высушивания.

В таблице 2 приведены данные о влиянии различных добавок (реагентов, сорбентов) на запах КП.

Большинство рассмотренных в таблице 2 добавок отличаются доступностью и экологической безопасностью, однако их использование не приводит к полному устранению НЗ, кроме того, применение сорбентов (цеолита, глауконита, угля, силикагеля и др.) увеличивает нагрузку КП балластными компонентами. Существенную опасность для ОС представляет технология обработки КП известью, поскольку под действием соответствующего реагента происходит резкое повышение эмиссии NH₃. Для

снижения негативных экологических последствий данный метод необходимо дополнять технологиями поглощения (связывания) NH₃ в нелетучие формы.

Заключение

Анализ опубликованных источников показывает, что проблема устранения запаха КП привлекает большое внимание исследователей, однако эффективные дезодорирующие добавки, позволяющие полностью устранить НЗ, не нанося вреда ОС, до настоящего времени не найдены. Сложность решаемой задачи обусловлена многокомпонентным и весьма переменчивым составом помёта, а также высоким содержанием биогенных органических веществ, являющихся хорошей питательной средой для развития МО.

Устранению НЗ способствует компостирование (в том числе с применением ЭМ-технологий), в процессе которого происходит естественная микробиологическая деструкция органических составляющих, однако данный способ является слишком длительным для условий промышленных предприятий, требует

специально оборудованных мест для складирования и созревания компоста, приводит к значительным потерям ценных компонентов КП (прежде всего азота) и выделению парниковых газов.

Более технологичными являются химические методы дезодорации, а также методы иммобилизации ЗОВ на твёрдых сорбентах. Согласно опубликованным данным, к значительному снижению запаха КП приводит сочетанное воздействие негашёной или гашёной извести (химические реагенты) и глауконита (сорбент) с последующим высушиванием смеси. Для глауконита характерно повышенное содержание калия (до 6%) и благоприятные экологические характеристики. Обогащение КП соответствующим материалом позволяет получить органоминеральное удобрение с более сбалансированным содержанием основных элементов минерального питания растений, чем исходный помёт. К недостаткам соответствующего метода следует отнести значительные потери азота (в форме NH_3) при разложении солей аммония в щелочной среде. Для предотвращения эмиссии NH_3 в атмосферу можно использовать технологию поглощения соответствующего газа раствором кислоты (например, серной). Образующийся при этом сульфат аммония может найти применение в качестве азотного удобрения.

References

1. RD-APK 1.10.15.02-17 Methodological recommendations for the technological design of manure and manure removal and preparation systems. Moskva: Rosinformagrotekh, 2017. 172 p. (in Russian).
2. Schetinina S., Kirkorova L. Obtaining environmentally friendly fertilizer by granulating poultry litter // Science, business, power – triad regional development: materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sankt-Peterburg: GNI "Natsrazvitie", 2019. P. 189–193 (in Russian).
3. Baskin-Graves L., Mullen H., Aber A., Sinisterra J., Ayub K., Amaya-Fuentes R., Wilson S. Rapid health impact assessment of a proposed poultry processing plant in Millsboro, Delaware // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2019. V. 16. No. 18. Article No. 3429. doi: 10.3390/ijerph16183429
4. Javed A., Imran M., Saad Hashmi M., Javaid U., Estella Odoh U., Amjad R. Chicken egg: a comprehensive overview regarding feed sources and human health aspects // World's Poult. Sci. J. 2025. V. 81. No. 1. P. 1–36. doi: 10.1080/00439339.2024.2439474
5. Niu J., Qiao Y., Yang X., Chen X., Li H., Guo Y., Zhang W., Wang Z. Protease and *Bacillus coagulans* supplementation in a low-protein diet improves broiler growth, promotes amino acid transport gene activity, strengthens intestinal barriers, and alters the cecal microbial composition // Animals. 2025. V. 15. No. 2. Article No. 170. doi:10.3390/ani15020170
6. Abdullah-Al-Amin M., Rahman M.S., Howlider M.A.R., Ahmmed M.M. Disposal of layer droppings reared in case and impact on environmental pollution // J. Bangladesh Agric. Univ. 2009. V. 7. No. 2. P. 281–290. doi: 10.3329/jbau.v7i2.4735
7. Sarker B.C., Alam M.A., Rahman M.M., Tarqul Islam A.F.M., Chowdhury M.G.F. Waste management of commercial poultry farms in Bangladesh // J. Innov. Dev. Strategy. 2009. V. 2. No. 3. P. 34–37.
8. Gobind Singh, Shamsuddin M.R., Aqsha, Lim S.W. Characterization of chicken manure from Manjung region // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. V. 458. Article No. 012084. doi: 10.1088/1757-899X/458/1/012084
9. Ivanov D.G. Method of energy processing of manure // Tekhnologii i Tekhnicheskie Sredstva Mekhanizirovannogo Proizvodstva Produktii Rastenievodstva i Zhivotnovodstva. 2010. No. 82. P. 135–141 (in Russian).
10. Pagliari P.H., Laboski C.A.M. Investigation of the inorganic and organic phosphorus forms in animal manure // J. Environ. Qual. 2012. V. 41. No. 3. P. 901–910. doi: 10.2134/jeq2011.0451
11. Turner B.L., Leytem A.B. Phosphorus compounds in sequential extracts of animal manures: chemical speciation and a novel fractionation procedure // Environ. Sci. Technol. 2004. V. 38. No. 22. P. 6101–6108. doi: 10.1021/es0493042
12. Fuentes B., Bolan N., Naidu R., de la Luz Mora M. Phosphorus in organic waste-soil systems // J. Soil Sci. Plant Nutr. 2006. V. 6. No. 2. P. 64–83. doi: 10.4067/S0718-27912006000200006
13. Mazur T., Wojtaś A. Content of microelements in poultry droppings // Roczniki Gleboznawcze. 1984. V. 35. No. 2. P. 28–34 (in Polish).
14. Khazan M.A., Meskhi B.Ch., Pavlov A.V. Ecological necessity and economic feasibility of processing chicken manure // Izvestiya vuzov. The North Caucasus region. Series: Natural Sciences. 2005. No. S9. P. 76–79 (in Russian).
15. Ravindran B., Mupambwa H.A., Silwana S., Mkeni P.N.S. Assessment of nutrient quality, heavy metals and phytotoxic properties of chicken manure on selected commercial vegetable crops // Heliyon. 2017. V. 3. No. 12. Article No. e00493. doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00493
16. Shang Y., Kumar S., Oakley B., Kim W.K. Chicken gut microbiota: importance and detection technology // Front. Vet. Sci. 2018. V. 5. Article No. 254. doi: 10.3389/fvets.2018.00254
17. Oakley B.B., Lillehoj H.S., Kogut M.H., Kim W.K., Maurer J.J., Pedroso A., Lee M.D., Collett S.R., Johnson T.J., Cox N.A. The chicken gastrointestinal microbiome // FEMS Microbiol. Lett. 2014. V. 360. No. 2. P. 100–112. doi: 10.1111/1574-6968.12608

18. Borda-Molina D., Seifert J., Camarinha-Silva A. Current perspectives of the chicken gastrointestinal tract and its microbiome // *Comput. Struct. Biotechnol. J.* 2018. V. 16. P. 131–139. doi: 10.1016/j.csbj.2018.03.002
19. Wei S., Morrison M., Yu Z. Bacterial census of poultry intestinal microbiome // *Poult. Sci.* 2013. V. 92. No. 3. P. 671–683. doi: 10.3382/ps.2012-02822
20. Iqbal Y., Cottrell J.J., Suleria H.A.R., Dunshea F.R. Gut microbiota-polyphenol interactions in chicken: a review // *Animals.* 2020. V. 10. No. 8. Article No. 1391. doi: 10.3390/ani10081391
21. Rychlik I. Composition and function of chicken gut microbiota // *Animals.* 2020. V. 10. No. 1. Article No. 103 doi: 10.3390/ani10010103
22. Byrd J.A., Caldwell D.Y., Nisbet D.J. The identification of fungi collected from the ceca of commercial poultry // *Poult. Sci.* 2017. V. 96. No. 7. P. 2360–2365. doi: 10.3382/ps/pew486
23. Robinson K., Xiao Y., Johnson T.J., Chen B., Yang Q., Lyu W., Wang J., Fansler N., Becker S., Liu J., Yang H., Zhang G. Chicken intestinal mycobiome: initial characterization and its response to bacitracin methylene disalicylate // *Appl. Environ. Microbiol.* 2020. V. 86. No. 13. Article No. e00304-20. doi: 10.1128/AEM.00304-20
24. Robinson K., Yang Q., Stewart S., Whitmore M.A., Zhang G. Biogeography, succession, and origin of the chicken intestinal mycobiome // *Microbiome.* 2022. V. 10. No. 1. Article No. 55. doi: 10.1186/s40168-022-01252-9
25. Gabriel I., Lessire M., Mallet S., Guillot J.F. Microflora of the digestive tract: critical factors and consequences for poultry // *World's Poult. Sci. J.* 2006. V. 62. No. 3. P. 499–511. doi: 10.1017/S0043933906001115
26. Apajalahti J., Vienola K. Interaction between chicken intestinal microbiota and protein digestion // *Anim. Feed Sci. Tech.* 2016. V. 221. P. 323–330. doi: 10.1016/j.anifeedsci.2016.05.004
27. Mozurienne E., Mockus E., Klupsaite D., Starkute V., Tolpeznikaite E., Gruzauskas V., Gruzauskas R., Paulauskaite-Taraseviciene A., Raudonis V., Bartkiene E. Physical and chemical characteristics of droppings as sensitive markers of chicken health status // *Animals.* 2024. V. 14. No. 9. Article No. 1389. doi: 10.3390/ani14091389
28. Deng W., Zhang A., Chen S., He X., Jin L., Yu X., Yang S., Li B., Fan L., Ji L., Pan X., Zou L. Heavy metals, antibiotics and nutrients affect the bacterial community and resistance genes in chicken manure composting and fertilized soil // *J. Environ. Manage.* 2020. V. 257. Article No. 109980. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109980
29. Chen X., Liu R., Hao J., Li D., Wei Z., Teng R., Sun B. Protein and carbohydrate drive microbial responses in diverse ways during different animal manures composting // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 271. P. 482–486. doi: 10.1016/j.biortech.2018.09.096
30. Guryanov D.V., Khmyrov V.D., Makarov V.A., Papikhin R.V., Maslova M.V. Analysis of mushroom microbiota in chicken litter to cut the time of preparing organic fertilizers in bunkers with the disinfectant aerator of the nest manure // *Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev.* 2018. No. 1 (37). P. 74–79 (in Russian).
31. Zhang D., Sun J., Wang D., Peng S., Wang Y., Lin X., Yang X., Hua Q., Wu P. Comparison of bacterial and fungal communities structure and dynamics during chicken manure and pig manure composting // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023. V. 30. P. 94347–94360. doi: 10.1007/s11356-023-29056-w
32. Jiang Y., Yao Y., Liu H., Zhang S., Bai X., Ma X., Wang Y., Ren Q. Volatile organic compounds conversion pathways and odor gas emission characteristics in chicken manure composting process // *Front. Ecol. Evol.* 2023. V. 11. Article No. 1192132. doi: 10.3389/fevo.2023.1192132
33. Lovanh N., Cook K.L., Rothrock M.J., Miles D.M., Sistani K. Spatial shifts in microbial population structure within poultry litter associated with physicochemical properties // *Poult. Sci.* 2007. V. 86. No. 9. P. 1840–1849. doi: 10.1093/ps/86.9.1840
34. Kyakuwaire M., Olupot G., Amoding A., Nkedi-Kizza P., Ateenyi Basamba T. How safe is chicken litter for land application as an organic fertilizer?: A review // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2019. V. 16. No. 19. Article No. 3521. doi: 10.3390/ijerph16193521
35. Tan H.Q., Li M., Jie D.F., Zhou Y.F., Li X.A. Effects of different litters on ammonia emissions from chicken manure // *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 2019. V. 12. No. 4. P. 27–33. doi: 10.25165/j.ijabe.20191204.5011
36. Naseem S., King A.J. Ammonia production in poultry houses can affect health of humans, birds, and the environment – techniques for its reduction during poultry production // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018. V. 25. No. 16. P. 15269–15293. doi: 10.1007/s11356-018-2018-y
37. Pohl H.R., Citra M., Abadin H.A., Szadkowska-Stańczyk I., Kozajda A., Ingerman L., Nguyen A., Murray H.E. Modeling emissions from CAFO poultry farms in Poland and evaluating potential risk to surrounding populations // *Regul. Toxicol. Pharmacol.* 2017. V. 84. P. 18–25. doi: 10.1016/j.yrtph.2016.11.005
38. Bist R.B., Subedi S., Chai L., Yang X. Ammonia emissions, impacts, and mitigation strategies for poultry production: A critical review // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 328. Article No. 116919. doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116919
39. Konkol D., Popiela E., Skrzypczak D., Izydorec G., Mikula K., Moustakas K., Opaliński S., Korczyński M., Witek-Krowiak A., Chojnacka K. Recent innovations in various methods of harmful gases conversion and its mechanism in poultry farms // *Environ. Res.* 2022. No. 214. Pt. 2. Article No. 113825. doi: 10.1016/j.envres.2022.113825
40. Swelum A.A., El-Saadony M.T., Abd El-Hack M.E., Abo Ghanima M.M., Shukry M., Alhotan R.A., Hussein E.O.S., Suliman G.M., Ba-Awadh H., Ammari A.A., Taha A.E., El-Tarabily K.A. Ammonia emissions in poultry houses and microbial nitrification as a promising reduction strate-

gy // Sci. Total Environ. 2021. V. 781. Article No. 146978. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146978

41. Mowrer J., Cabrera M., Rasmussen T., Cassity-Duffey K. Nitrogen in stored poultry litter: Uric acid and xanthine // J. Environ. Qual. 2014. V. 43. No. 6. P. 2137–2145. doi: 10.2134/jeq2014.05.0240

42. Kim W.K., Patterson P.H. Effect of minerals on activity of microbial uricase to reduce ammonia volatilization in poultry manure // Poult. Sci. 2003. V. 82. No. 2. P. 223–231. doi: 10.1093/ps/82.2.223

43. Singh A., Casey K.D., King W.D., Pescatore A.J., Gates R.S., Ford M.J. Efficacy of urease inhibitor to reduce ammonia emission from poultry houses // J. Appl. Poult. Res. 2009. V. 18. No. 1. P. 34–42. doi: 10.3382/japr.2008-00046

44. Thillainayagi S., Harikrishnan S., Jayalakshmi S. Screening, optimization and production of uricase from *Alcaligenes faecalis* isolated from poultry farm litter // Int. J. Sci. Res. Growth. 2021. V. 9. No. 4. P. 69–74.

45. Nanda P., Jagadeesh Babu P.E. Isolation, screening and production studies of uricase producing bacteria from poultry sources // Prep. Biochem. Biotechnol. 2014. V. 44. No. 8. P. 811–821. doi: 10.1080/10826068.2013.867875

46. Krajewska B., Ureasas I. Functional, catalytic and kinetic properties: A review // J. Mol. Catal. B: Enzym. 2009. V. 59. No. 1–3. P. 9–21. doi: 10.1016/j.molcatb.2009.01.003

47. Qin Y., Cabral J.M.S. Properties and applications of urease // Biocatal. Biotransformation. 2002. V. 20. No. 1. P. 1–14. doi: 10.1080/10242420210154

48. Wang H., Miao L., Sun X., Wu L., Fan G. Experimental study of enzyme-induced carbonate precipitation for high temperature applications by controlling enzyme activity // Geomicrobiol. J. 2022. V. 39. No. 6. P. 502–514. doi: 10.1080/01490451.2022.2045649

49. Li R., Zheng M., Zheng M., Cai R., Cui X., Wang Y., Jiang X., Xu C. Metagenomic analysis reveals the linkages between bacteria and the functional enzymes responsible for potential ammonia and biogenic amine production in alfalfa silage // J. Appl. Microbiol. 2022. V. 132. No. 4. P. 2594–2604. doi: 10.1111/jam.15411

50. Wójcik W., Łukasiewicz M., Puppel K. Biogenic amines: formation, action and toxicity – a review // J. Sci. Food Agric. 2021. V. 101. No. 7. P. 2634–2640. doi: 10.1002/jsfa.10928

51. Buňková L., Buňka F., Klčovská P., Mrkvička V., Doležalová M., Kráčmar S. Formation of biogenic amines by Gram-negative bacteria isolated from poultry skin // Food Chem. 2010. V. 121. No. 1. P. 203–206. doi: 10.1016/j.foodchem.2009.12.012

52. Zhang Y., Liang Z., Tang C., Liao W., Yu Y., Li G., Yang Y., An T. Malodorous gases production from food wastes decomposition by indigenous microorganisms // Sci. Total Environ. 2020. V. 717. Article No. 137175. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137175

53. Chen M., Cao Z., Jing B., Chen W., Wen X., Han M., Wang Y., Liao X., Wu Y., Chen T. The production of

methyl mercaptan is the main odor source of chicken manure treated with a vertical aerobic fermenter // Environ. Res. 2024. V. 260. Article No. 119634. doi: 10.1016/j.envres.2024.119634

54. Clanton C.J., Schmidt D.R. Sulfur compounds in gases emitted from stored manure // Trans. ASAE. 2000. V. 43. No. 5. P. 1229–1239. doi: 10.13031/2013.3016

55. Wang Y., Huang M., Meng Q., Wang Y. Effects of atmospheric hydrogen sulfide concentration on growth and meat quality in broiler chickens // Poult. Sci. 2011. V. 90. No. 11. P. 2409–2414. doi: 10.3382/ps.2011-01387

56. Cai S., Ma Y., Bao Z., Yang Z., Niu X., Meng Q., Qin D., Wang Y., Wan J., Guo X. The impacts of the C/N ratio on hydrogen sulfide emission and microbial community characteristics during chicken manure composting with wheat straw // Agriculture. 2024. V. 14. No. 6. Article No. 948. doi: 10.3390/agriculture14060948

57. Sun B., Hou L., Yang Y. Effects of adding eubiotic lignocellulose on the performance, the gut microbiota, and short-chain fatty acids of layer chickens // Braz. J. Microbiol. 2022. V. 53. No. 4. P. 2205–2213. doi: 10.1007/s42770-022-00796-0

58. Sun B., Hou L., Yang Y. Effects of adding eubiotic lignocellulose on the growth performance, laying performance, gut microbiota, and short-chain fatty acids of two breeds of hens // Front. Vet. Sci. 2021. V. 8. Article No. 668003. doi: 10.3389/fvets.2021.668003

59. Zhou G., Huang X., Zhang S., Xiang Z., Wei J., Ma S., Teng S., Zheng Z. Volatile fatty acids (VFAs) production from sludge and chicken manure anaerobic co-fermentation: Effects of mixing ratio and microbial mechanisms // J. Environ. Chem. Eng. 2024. V. 12. No. 5. Article No. 114014. doi: 10.1016/j.jece.2024.114014

60. Li M.X., He X.S., Tang J., Li X., Zhao R., Tao Y.Q., Wang C., Qiu Z.P. Influence of moisture content on chicken manure stabilization during microbial agent-enhanced composting // Chemosphere. 2021. V. 264. Pt. 2. Article No. 128549. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128549

61. Ma Q., Li Y., Xue J., Cheng D., Li Z. Effects of turning frequency on ammonia emission during the composting of chicken manure and soybean straw // Molecules. 2022. V. 27. No. 2. Article No. 472. doi: 10.3390/molecules27020472

62. Yang G.Q., Yin Y., Liu H.Y., Liu G.H. Effects of dietary oligosaccharide supplementation on growth performance, concentrations of the major odor-causing compounds in excreta, and the cecal microflora of broilers // Poult. Sci. 2016. V. 95. No. 10. P. 2342–2351. doi: 10.3382/ps/pew124

63. Borowski S., Matusiak K., Powalowski 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

64. Zhao H., Li S., Pu J., Wang H., Dou X. Effects of Bacillus-based inoculum on odor emissions co-regulation,

- nutrient element transformations and microbial community topological structures during chicken manure and sawdust composting // *J. Environ. Manage.* 2024. V. 354. Article No. 120328. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.120328
65. Hidayat M.Y., Saud H.M., Samsudin A.A. Reduction of hydrogen sulphide in chicken manure by immobilized sulphur oxidising bacteria isolated from hot spring // *Microbiol. Biotechnol. Lett.* 2019. V. 47. No. 1. P. 116–124. doi: 10.4014/mbl.1801.01005
66. Borowski S., Gutarowska B. Odor removal from the environment through the action of microorganisms // *Proceeding of the International Symposium “New Research in Biotechnology”*. Bucharest, Romania, 2008. doi: 10.13140/2.1.3560.5765
67. Lu D., Mi J., Wu Y., Liang J., Liao X., Wang Y. Effects of different laying hen species on odour emissions // *Animals*. 2020. V. 10. No. 11. Article No. 2172. doi: 10.3390/ani10112172
68. 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
69. Turan N.G., Akdemir A., Ergun O.N. Emission of volatile organic compounds during composting of poultry litter // *Water Air Soil Pollut.* 2007. V. 184. P. 177–182. doi: 10.1007/s11270-007-9406-0
70. Fakkaew K., Kongkratoke S., Tantrakarnapa K., Polprasert C., Sudsandee S. Characteristics of gases emitted from chicken manure wastewater and potential effects on human health // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022. V. 29. No. 42. P. 63227–63232. doi: 10.1007/s11356-022-20357-0
71. Glindemann D., Edwards M., Liu J.A., Kuschk P. Phosphine in soils, sludges, biogases and atmospheric implications – a review // *Ecol. Eng.* 2005. V. 24. No. 5. P. 457–463. doi: 10.1016/j.ecoleng.2005.01.002
72. Yoshio Y., Nagata E. Measurement of odor threshold by triangle odor bag method // *Odor measurement review*. Kawasaki City: Ministry of the Environment, Government of Japan, 2003. P. 118–127.
73. Suzuki N., Nakaoka H., Eguchi A., Hanazato M., Nakayama Y., Tsumura K., Takaguchi K., Takaya K., Todaka E., Mori C. Concentrations of formic acid, acetic acid, and ammonia in newly constructed houses // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020. V. 17. No. 6. Article No. 1940. doi: 10.3390/ijerph17061940
74. Xiao Z., Lu J.R. Generation of acetoin and its derivatives in foods // *J. Agric. Food Chem.* 2014. V. 62. No. 28. P. 6487–6497. doi: 10.1021/jf5013902
75. Sharma N.K., Choct M., Wu S., Swick R.A. Nutritional effects on odour emissions in broiler production // *World’s Poult. Sci. J.* 2017. V. 73. No. 2. P. 257–280. doi: 10.1017/S0043933917000046
76. Enticknap J.J., Nonogaki H., Place A.R., Hill R.T. Microbial diversity associated with odor modification for production of fertilizers from chicken litter // *Appl. Environ. Microbiol.* 2006. V. 72. No. 6. P. 4105–4114. doi: 10.1128/AEM.02694-05
77. Qiu Z., Li M., Song L., Wang C., Yang S., Yan Z., Wang Y. Study on nitrogen-retaining microbial agent to reduce nitrogen loss during chicken manure composting and nitrogen transformation mechanism // *J. Cleaner Prod.* 2021. V. 285. Article No. 124813. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124813
78. Zhao K., Jia X., Lin J., Zhao J., Lin C., Chen J. Comparing the promoting effect of constructed bacterial agents and mature compost on chicken manure composting // *Waste Biomass Valor.* 2024. V. 15. No. 2. P. 727–741. doi: 10.1007/s12649-023-02179-4
79. DeLaune P.B., Moore P.A. Jr., Daniel T.C., Lemunyon J.L. Effect of chemical and microbial amendments on ammonia volatilization from composting poultry litter // *J. Environ. Qual.* 2004. V. 33. No. 2. P. 728–734. doi: 10.2134/jeq2004.7280
80. 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
81. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashikhmina T.Ya. Basic approaches to reducing odor pollution of the environment by livestock farms (review) // *Theoretical and Applied Ecology*. 2024. No. 3. P. 6–19 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2024-3-006-019
82. Nahm K.H. Environmental effects of chemical additives used in poultry litter and swine manure // *Crit. Rev. Env. Sci. Technol.* 2005. V. 35. No. 5. P. 487–513. doi: 10.1080/10643380590966208
83. Tasistro A.S., Kissel D.E. Composition of aqueous extracts of broiler litter treated with aluminum sulfate, ferrous sulfate, ferric chloride and gypsum // *J. Environ. Sci. Health B*. 2006. V. 41. No. 6. P. 989–1000. doi: 10.1080/03601230600808620
84. 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
85. Syrchina N.V., Philip 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
86. Ritz C.W., Fairchild B.D., Lacy M.P. Implications of ammonia production and emissions from commercial poultry facilities: A review // *J. Appl. Poult. Res.* 2004. V. 13. No. 4. P. 684–692. doi: 10.1093/japr/13.4.684
87. Jensen A.Ø. Changing the environment in swine buildings using sulfuric acid // *Transactions of the ASAE*. 2022. V. 45. No. 1. P. 223–227. doi: 10.13031/2013.7874
88. 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
89. 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. 3. P. 143–148 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-143-148
90. 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
91. Maguire R.O., Hesterberg D., Gernat A., Anderson K., Wineland M., Grimes J. Liming poultry manures to decrease soluble phosphorus and suppress the bacteria population // *J. Environ. Qual.* 2006. V. 35. No. 3. P. 849–857. doi: 10.2134/jeq2005.0339
92. Fangueiro D., Hjorth M., Gioelli F. Acidification of animal slurry – a review // *J. Environ. Manage.* 2015. V. 149. P. 46–56. doi: 10.1016/j.jenvman.2014.10.001
93. Arifin B., Bono A., Janaun J. The transformation of chicken manure into mineralized organic fertilizer // *J. Sustainable Sci. Manage.* 2006. V. 1. P. 58–63.
94. Rothrock M.J. Jr., Cook K.L., Warren J.G., Eiteman M.A., Sistani K. Microbial mineralization of organic nitrogen forms in poultry litters // *J. Environ. Qual.* 2010. V. 39. No. 5. P. 1848–1857. doi: 10.2134/jeq2010.0024
95. Loch F.C., de Oliveira M.C., da Silva D., Gonçalves B.N., de Faria B.F., Menezes J.F.S. Quality of poultry litter submitted to different treatments in five consecutive flocks // *R. Bras. Zootec.* 2011. V. 40. No. 5. P. 1025–1030. doi: 10.1590/S1516-35982011000500013
96. Gonçalves N.S., Komiyama C.M., da Rosa C.C.B., de Lima J.F.P., de Moraes M.D.G., Savegnago F.B., Mezzalira Júnior C., Staub L. Quality of chicken litter and the alternative of acidification as treatment // *Nativa*. 2019. V. 7. No. 6. P. 828–834 (in Portuguese). doi: 10.31413/nativa.v7i6.7041
97. Ghaly A.E., Alhattab M. Drying poultry manure for pollution potential reduction and production of organic fertilizer // *American Journal of Environmental Sciences*. 2013. V. 9. No. 2. P. 88–102. doi: 10.3844/ajessp.2013.88.102
98. Maruthai Pillai S. Intercomparison of headspace sampling methods coupled to TD-GC-MS/O to characterize key odorants from broiler chicken litter: PhD thesis. Sydney: UNSW, 2011. 294 p. doi: 10.26190/unsworks/14999
99. Liu Y., Ma R., Tang R., Zheng G., Li G., Yin J., Yuan J. Phosphate, magnesium containing additives and biochar regulate compost maturity and synergistically reduce odor emission in chicken manure composting: Role of physicochemical, bacterial and fungal dynamics // *J. Environ. Manage.* 2024. V. 371. Article No. 123205. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.123205
100. Sharadqah S.I., Al-Dwairi R.A. Control of odorants emissions from poultry manure using Jordanian natural zeolites // *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2010. No. 4 (4). P. 378–388.
101. Sánchez-Monedero M.A., Sánchez-García M., Alburquerque J.A., Cayuela M.L. Biochar reduces volatile organic compounds generated during chicken manure composting // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 288. Article No. 121584. doi: 10.1016/j.biortech.2019.121584
102. Pillai S.M., Parsi G., Wang X., Stuetz R.M. Odour abatement of poultry litter using odour control products // *Chemical Engineering Transactions*. 2012. No. 30. P. 247–252. doi: 10.3303/CET1230042
103. Pang Y., Zhen F., Wang D., Luo Z., Huang J., Zhang Y. Effects of biochar combined with MgO desulfurization waste residue on nitrogen conversion and odor emission in chicken manure composting // *Environ. Technol.* 2024. V. 45. No. 23. P. 4779–4790. doi: 10.1080/09593330.2023.2283086
104. Amon M., Dobeic M., Sneath R.W., Phillips V.R., Misselbrook T.H., Pain B.F. A farm-scale study on the use of clinoptilolite zeolite and De-Odorase® for reducing odour and ammonia emissions from broiler houses // *Bioresour. Technol.* 1997. V. 61. No. 3. P. 229–237. doi: 10.1016/S0960-8524(97)00005-9
105. Khopyak N., Manenko A., Tkachenko H., Khopyak K. Using of glauconite for neutralization of fresh poultry manure // *The Commonwealth of Sciences. Baranovichi-2017: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh issledovateley. Baranovichi: BarSU, 2017. Pt. 3. P. 224–226.*
106. Filchenkov O.A., Slyusarenko V.V., Rusinov A.V., Sakseev R.V., Skosyrev K.V. Method for utilization and disinfection of chicken manure // Patent RU 2645901 C1. Application: 2017114614, 27.04.2017. Date of publication: 28.02.2018. Bull. 7 (in Russian).
107. Khazgaliev N.V. Method of processing poultry droppings // Patent RU 2647918 C1. Application: 2017122108, 22.06.2017. Date of publication: 21.03.2018. Bull. 9 (in Russian).
108. Khajrullin R.M. Method of producing fertilizer from chicken manure // Patent RU 2731291 C1. Application: RU2019117588A, 06.06.2019. Date of publication: 01.09.2020. Bull. 25 (in Russian).
109. Donnell C., Parker D.B., Matlack R.S., Caraway E.A., Rhoades M.B., Spears J. Zeolite amendment to minimize ammonia, hydrogen sulfide, and VOC emissions // *ASABE Annual International Meeting*. Providence, Rhode Island: ASABE, 2008. Article No. 084133. doi: 10.13031/2013.24963
110. Cai L., Koziel J.A., Liang Y., Nguyen A.T., Xin H. Evaluation of zeolite for control of odorants emissions from simulated poultry manure storage // *J. Environ. Qual.* 2007. V. 36. No. 1. P. 184–193. doi: 10.2134/jeq2006.0052