



ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭКОЛОГИЯ

INDUSTRIAL ECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-1-32-40

EDN: GUMLVG

УДК 628.5

Научная статья / Research article

Технология снижения газовых выбросов животноводческих ферм

Н.Б. Бондаренко¹✉, Н.В. Кондакова²,
С.В. Старовойтов³, Д.А. Бутко¹

¹Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
им. М.И. Платова, Ростовская область, г. Новочеркасск, Российская Федерация

³Ростовский государственный университет путей сообщения,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉nikbond@mail.ru

Аннотация. В исследовании представлен обзор методов обезвреживания загрязняющих веществ в выбросах от объектов животноводческих хозяйств. Представлена принципиальная возможность очистки газов с применением сорбентов на основе природных материалов. Опытные испытания проводились на территории действующей животноводческой фермы в Республике Калмыкия. В ходе эксперимента варьировался тип сорбционной загрузки биофильтра, что позволило оценить основные требования, инженерные основы, принципы работы, применимость, экономическую эффективность и потенциальные отказы предложенного метода.

Ключевые слова: воздушные поллютанты, дурнопахнущие вещества, выбросы животноводческих ферм, биосорбер

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

© Бондаренко Н.Б., Кондакова Н.В., Старовойтов С.В., Бутко Д.А., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

История статьи: поступила в редакцию 15.09.2023; доработана после рецензирования 20.11.2023; принята к публикации 29.11.2023.

Для цитирования: *Бондаренко Н.Б., Кондакова Н.В., Старовойтов С.В., Бутко Д.А.* Технология снижения газовых выбросов животноводческих ферм // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 1. С. 32–40. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-1-32-40>

Technology for reducing gas emissions from livestock farms

Nikita B. Bondarenko¹✉, Nadezda V. Kondakova²,
Sergey V. Starovoytov³, Denis A. Butko¹

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

²Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
Novocherkassk, Russian Federation

³Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉nikbond@mail.ru

Abstract. The study provides an overview of methods for neutralizing pollutants from emissions from livestock facilities. The principal possibility of gas purification with the use of sorbents based on natural materials is presented. Pilot tests were conducted on the territory of an operating livestock farm in the Republic of Kalmykia. During the experiment, the type of sorption loading of the biofilter varied, which made it possible to assess the basic requirements, engineering fundamentals, principles of operation, applicability, economic efficiency and potential failures of the proposed method.

Keywords: air pollutants, foul-smelling substances, emissions from livestock farms, biosorbent

Authors' contributions. All authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Article history: received 15.09.2023; revised 20.11.2023.; accepted 29.11.2023.

For citation: Bondarenko NB, Kondakova NV, Starovoytov SV, Butko DA. Technology for reducing gas emissions from livestock farms. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(1):32–40. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-1-32-40>

В последнее десятилетие на территории России наблюдается довольно динамичное развитие сельскохозяйственной деятельности, производство продуктов из растительного и животного сырья. Появление широкого ряда крупных АПК и высокопроизводительных перерабатывающих предприятий подразумевает, прежде всего, источники повышенной техносферной опасности, где главным негативным фактором, влияющим на состояние ОС и здоровье населения [1; 2], выступают воздушные и водные загрязнители.

Наиболее вредными воздушными загрязнителями, поступающими в атмосферу в процессе производственных циклов предприятий сельско-

хозяйственной направленности являются парниковые газы¹ с основным составом в виде диоксида углерода (CO₂), метана (CH₄), оксида азота (NO), диоксида азота (NO₂), аммиака (NH₃), сернистых соединений и значительного количества пыли (биоаэрозолей)². Немаловажным фактором является наличие дурнопахнущих веществ, образующихся на животноводческих и птицеводческих комплексах при содержании животных, уборке и хранении птичьего помета и навоза³.

Особое внимание следует обратить на то, что в подавляющем большинстве современных производственных процессов в сельском хозяйстве и при переработке продуктов из животного сырья до сих пор используются открытые технологические циклы, не исключая выброса воздушных загрязнителей в окружающую среду. Данная тенденция наблюдается даже в экономически развитых странах, где большое внимание уделяется разработке безотходных технологий с комплексной переработкой или удалением побочных продуктов в замкнутых производственных циклах⁴.

Обозревая основные методы очистки и обезвреживания отходящих газов сельскохозяйственной деятельности, в первую очередь следует обратить внимание на их химический и дисперсный состав. Наиболее распространенными видами оборудования для улавливания частиц пыли и капельной жидкости являются циклонные или тканевые (рукавные) фильтры, где удаление частиц загрязнителей происходит под действием центробежной силы и посредством дальнейшей бункеровки или удаления накопившейся массы обратной продувкой. Данный метод фильтрации довольно эффективен и прост в обслуживании, однако не позволяет снизить ПДК некоторых воздушных загрязнителей до приемлемых показателей из-за возможности улавливания только крупных частиц (40...1000 мкм).

Аппараты для мокрой очистки газов получили широкое применение, так как они характеризуются эффективной очисткой и улавливанием пожароопасных пылей и в тех случаях, когда параллельно требуется доочистить воздух от токсичных примесей и паров. Один из распространенных аппаратов этого типа – ротоциклон, где смесь загрязненного воздуха под давлением, создаваемым вихревым потоком, проходит через слой воды, в котором осаждаются тяжелые частицы, откуда затем удаляются. Однако аппараты подобного технологического принципа имеют ряд существенных недостатков,

¹ Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Guidance document on control techniques for emissions of sulphur, NO_x, VOCs, dust (including PM₁₀, PM_{2.5} and black carbon) from stationary sources. Informal document No. 2. Provisional Agenda Item 5. Draft guidance documents to the revised 1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. Working Group on Strategies and Review, Fiftieth session, 10-14 September 2012. P. 268.

² Охрана окружающей среды в России. 2020: стат. сб. / Росстат. М., 2020. С. 34–38.

³ Доклад о кадастре антропогенных выбросов парниковых газов Республики Хакасия за 2019 год. 2020: стат. сб. / Минприроды России. М., 2020. С. 34–37.

⁴ European Commission. Reference Document on Best Available Techniques for Intensive Rearing of Poultry and Pigs. 2013. P. 32–39, 183–197.

ограничивающих область их применения: образование значительной массы шлама с последующим удалением и переносом, образование конденсированных отложений в газовадах и необходимость в подаче оборотной воды в уловитель.

Альтернативными решениями по очистке воздуха являются системы адсорбционного и абсорбционного поглощения, где поглощение загрязняющего вещества осуществляется объемом другого тела. Данные методы являются наиболее распространенными и применяются для удаления нерастворимых (или слабо растворимых) поллютантов в воде или поглощения веществ загрязнителей поверхностным слоем твердого тела (активированный уголь, алюмогели, силикагели, глиноземы и т.д.). Технологические узлы подобного типа позволяют селективно удалять довольно широкий спектр загрязнителей, таких как диоксид серы (SO_2), сероводород (H_2S), оксид азота (NO), диоксид азота (NO_2), аммиак (NH_3), а также различные соединения углеводорода (CH_4). Более того, вышеописанные методы позволяют достигнуть не только высокого экологического значения, но и экономического, поскольку позволяют возвращать в воздухообменную систему повышенный объем паров летучих растворителей, что в особой степени актуально при использовании в сельскохозяйственном производстве закрытого типа (на птицефабриках, в коровниках и т.д.). К недостаткам подобных систем относится финансовая невыгодность в покупке дорогостоящих адсорбентов и логистические трудности доставки в удаленные сельские районы.

Анализируя профильные данные тематических литературных источников, применение органических загрузок для абсорбционной очистки воздуха является перспективным направлением, подразумевающим не только экономическую выгоду, но и повышение экологичности технологических процессов очистки [4; 5].

Газофазные биофильтры представляют собой биологические реакторы, в которых используются микроорганизмы, колонизирующие пористую среду, для разложения загрязняющих веществ из воздушного потока. Биофильтры обладают потенциалом очистки больших объемов загрязнителей воздуха при низких концентрациях, что часто встречается при эмиссии газов отходов сельского хозяйства. Аммиак удаляется из воздушного потока путем адсорбции на твердой среде биофильтра (также при орошении загрузки, абсорбции жидкостью), а затем окисляется посредством микробной нитрификации, которая представляет собой аэробное превращение NH_3 в нитриты (NO_2^-) и нитраты (NO_3^-) [5]. Плохое проникновение кислорода в среду биофильтра приводит к потенциальным бескислородным/анаэробным микробным метаболическим условиям, которые будут подавлять нитрификацию и повышать вероятность денитрификации. Использование соломы в основе загрузки сорбента позволяет минимизировать данные риски.

Рассматривая отдельный объект технофермы опасности, коллективом авторов данной статьи было проведено исследование по очистке газовых выбросов животноводческой фермы, расположенной в полупустынной зоне в

Республике Калмыкия. Экспериментальная часть основывалась на применении разработанной ранее экспериментальной установки [6], где в качестве загрузки абсорберов применялись кремнийсодержащие породы (бентонит и диатомит), а также предварительно подготовленная пшеничная солома местного происхождения. Применение данных материалов объясняется эффективностью удаления ЗВ, низкой стоимостью и высокой сорбционной емкостью [7].

Модель установки представляет собой емкость, моделирующую приемную камеру-лагуну для хранения отходов жизнедеятельности КРС. Внутри модельной емкости установлен регулируемый воздушный нагнетатель, позволяющий осуществлять выброс направленного потока воздуха со скоростью больше или равно 1,5...2 м/с, что практически идентично соответствует показателям из камер-лагун по результатам, полученным непосредственно на месте. Параллельный опыт подразумевал прохождение загрязненного потока воздуха через три модели абсорберов с сорбирующей загрузкой из различных материалов. Общий вид параллельного опыта и установок изображен на рис. 1.



Рис. 1. Установки в момент проведения измерения
Источник: фотография автора.

Используемые модели биосорберов с органической сорбирующей загрузкой представляют собой емкость объемом 200 мл, куда помещена подготовленная солома, объем которой равен примерно 55 см^3 . Для выбора наиболее эффективной загрузки проводился параллельный опыт на трех моделях с различными вариантами рабочего сырья, где исходная пшеничная солома смешивалась с термически модифицированной кремнийсодержащей породой одного из месторождений Ростовской области ($D \approx 1 \text{ мм}$, $V = 16 \text{ см}^3$), а также золой этой же соломы, карбонизированной при температуре около $250 \dots 300 \text{ }^\circ\text{C}$ ($V = 16 \text{ см}^3$):

1. Подготовленная пшеничная солома ($V = 55 \text{ см}^3$).
2. Подготовленная пшеничная солома + термически модифицированная кремнийсодержащая порода ($V = 55 + 16 = 71,5 \text{ см}^3$).
3. Подготовленная пшеничная солома + карбонизат соломы ($V = 55 + 16 = 71,5 \text{ см}^3$)

Биосорберы герметично присоединялись к установкам, где объем воздушного потока с ЗВ проходил через адсорбирующую загрузку. Далее, на выходе из проводящих камер в крайних точках установок, были установлены силиконовые шланги для прямого подсоединения к СИ (газоанализаторам). Общий вид биосорберов с органической загрузкой в момент проведения измерения представлен на рис. 2.



Рис. 2. Общий вид биосорберов с органической загрузкой
Источник: фотография автора.

В качестве раствора, имитирующего выброс воздушных поллютантов, из приемной камеры-лагуны были отобраны отходы жизнедеятельности КРС и МРС, смешанные с дождевой водой ($V = 2,5$ л).

Для измерения концентрации ЗВ в выбросах из модельных емкостей применялись газоанализаторы Эко-Интех ЭЛАН и Колион 1-В, имеющие действующие свидетельства о поверке средств измерения.

В табл. 1 представлены исходные концентрации газовых выбросов от модельного раствора, сравниваемые с нормативами СанПин 1.2.3685-21 в мг/м^3 (как средние результаты трех параллельных измерений)⁵.

Таблица 1. Сравнительные показатели состава газовых выбросов модельного раствора и ПДК по СанПин 1.2.3685-21

№ п/п	Определяемый показатель (газ)	Ед. изм.	Результат измерений	ПДК м.р.
1	CO (оксид углерода)	мг/м^3	7,03	5
2	NO (оксид азота)	мг/м^3	0,005	0,4
3	NO ₂ (диоксид азота)	мг/м^3	0,553	0,2
4	H ₂ S (сероводород)	мг/м^3	0,35	0,008
5	SO ₂ (диоксид серы)	мг/м^3	0,49	0,5
6	NH ₃ (аммиак)	мг/м^3	11,0	0,2

Источник: составлено авторами.

Согласно полученным данным измерения исходной концентрации ЗВ (табл. 1), очевидно, что некоторые показатели значительно превышают нормы ПДК (согласно требованиям СанПин 1.2.3685-21), поэтому коллективом авторов данного исследования было принято решение по поиску наиболее оптимизированного состава абсорбционной загрузки в трех различных вариантах.

В основу данного эксперимента входили три параллельных измерения обрабатываемых газовых выбросов, где измерение концентрации ЗВ производилось в 5 контрольных временных отрезках с интервалами в 30 минут. Данная методика позволила установить наиболее эффективный органический состав загрузок, применяемых в биосорберах. Из результатов контрольных измерений в 5-й контрольной временной точке (табл. 2) удалось выявить динамику (удаление ЗВ выражено в %) по существенному снижению концентрации почти по всем показателям, где исключением выступает лишь незначительное увеличение эмиссии воздушных поллютантов только одной группы.

Исходя из окончательных данных параллельных измерений, представленных в табл. 2, очевидна рациональность использования смеси из подобранных органических материалов. Процентное соотношение значений удаленных веществ (см. табл. 1) указывает на практически полную очистку всего

⁵ Постановление Главного государственного санитарного врача РФ «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (вместе с СанПиН 1.2.3685-21) от 28.01.2021 № 2 // Собрание законодательства Российской Федерации.

объема загрязненного воздуха, проходящего через абсорберы, установленные на модели, имитирующей выброс загрязнителей из приемных камер-лагунов. Незначительное увеличение эмиссии монооксида азота (NO) и оксида углерода (CO) может быть связано с возможным заполнением адсорбционных пор (энергоемкостью сорбента), поскольку использование подобных материалов в агрессивных средах ведет к довольно быстрому снижению адсорбционных характеристик [8].

Таблица 2. Результаты трех сравнительных измерений газовых выбросов (с % удаления), полученные с использованием биосорберов со смешанными наполнителями

№ п/п	Определяемый показатель (газ)	Ед.изм.	Результат измерений			ПДК м.р.
			Солома + бентонит + уголь	Солома + бентонит	Солома + уголь	
1	CO (оксид углерода)	мг/м ³	4,98 +29,2%	4,01 42,9%	4,92 30%	5
2	NO (монооксид азота)	мг/м ³	0,041 +4,1%	0,016 +1,6%	0,015 +1,5%	0,4
3	NO ₂ (диоксид азота)	мг/м ³	0,000 100%	0,091 83,5%	0,000 100%	0,2
4	H ₂ S (сернистый водород)	мг/м ³	0,00 100%	0,08 77,1%	0,00 100%	0,008
5	SO ₂ (диоксид серы)	мг/м ³	0,31 36,7%	0,39 20,4%	0,24 51%	0,5
6	NH ₃ (аммиак)	мг/м ³	0 100%	7,0 63,6%	0 100%	0,2

Источник: составлено авторами.

Результаты, полученные в ходе вышеописанного экспериментального параллельного опыта, позволяют сделать вывод об успешности и правильности подбора смешанных органических наполнителей для биосорберов. Дополнительным аддитивным фактором выступает эффективность подобного типа загрузок (исходя из данных табл. 2), практически приближенная к отметке полного удаления указанных групп воздушных загрязнителей, что позволяет выявить дальнейшую перспективу в разработке сорбирующих материалов из отходов сельскохозяйственной деятельности и кремнийсодержащих пород. Тематика использования подобных типов сорбентов в условиях реальных объектов промышленности и сельского хозяйства требует проведения дальнейших исследований по технологической эффективности.

Список литературы

- [1] *Игнатъева Л.П., Чирцова М.В., Потапова М.О.* Гигиена атмосферного воздуха: учебное пособие / ГБОУ ВПО ИГМУ Минздрава России, кафедра коммунальной гигиены и гигиены детей и подростков. Иркутск: ИГМУ, 2015. 12–27 с.
- [2] *Онищенко Г.Г., Рахманина Ю.А.* Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. 408 с.
- [3] *Баженов В.И., Королева Е. А.* Варианты технических решений по удалению запаха сточных вод // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 104–107.

- [4] Гаврилова Н.Н., Назаров В.В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных: учеб. пособие. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 132 с.
- [5] Maia G.D.N. Ammonia biofiltration and nitrous oxide generation during the start-up of gas-phase compost biofilters // Atmospheric Environment. 2012. Vol. 46. P. 659–664.
- [6] Кондакова Н.В., Бондаренко Н.Б., Серпокрылов Н.С. Пат. 214418 Российская Федерация, МПК В01D 53/34 (2006.01) В01D 53/84 (2006.01), СПК В01D 53/34 (2022.08) В01D 53/84 (2022.08). Сорбционный биофильтр для очистки газовой среды от загрязняющих и неприятно пахнущих летучих веществ / Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет». № 2022117635; заявл. 29.06.2022; опубл. 26.10.2022, Бюл. № 30.
- [7] Xiaohua Q., Mingzhu L., Zhenbin C. Preparation and Properties of Diatomite Composite Super Absorbent // Polymers for Advanced Technologies. 2007. 18(3). 184–193 с.
- [8] Simon W. Absorbent regeneration with flashed lean solution and heat integration. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2008063079A2/en> (дата обращения: 24.03.2023).

Сведения об авторах:

Бондаренко Никита Борисович, аспирант кафедры водоснабжения и водоотведения, Донской государственный технический университет, Российская Федерация, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1. E-mail: nikbond@mail.ru

Кондакова Надежда Валерьевна, аспирант кафедры водного хозяйства, инженерных сетей и защиты окружающей среды, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Российская Федерация, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132. E-mail: kondakova.nadya.v@yandex.ru

Старовойтов Сергей Вадимович, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики на железнодорожном транспорте, Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2. E-mail: se.starovoytov@yandex.ru

Бутко Денис Александрович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой водоснабжение и водоотведение, Донской государственный технический университет, Российская Федерация, 344010, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1. E-mail: den_111@mail.ru