

УДК 631.17.631.147

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-394-05-141-147

А.Ю. Брюханов

Э.В. Васильев

В.И. Базыкин

Е.В. Шалавина ✉

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) — филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Санкт-Петербург, Россия

✉ shalavinaev@mail.ru

Поступила в редакцию: 02.03.2025

Одобрена после рецензирования: 08.04.2025

Принята к публикации: 25.04.2025

© Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Базыкин В.И., Шалавина Е.В.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-394-05-141-147

Alexander Yu. Bryukhanov

Eduard V. Vasiliev

Valentin I. Bazykin

Ekaterina V. Shalavina ✉

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Saint Petersburg, Russia

✉ shalavinaev@mail.ru

Received by the editorial office: 02.03.2025

Accepted in revised: 08.04.2025

Accepted for publication: 25.04.2025

© Bryukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Bazykin V.I., Shalavina E.V.

Оценка концентраций климатически активных веществ в выбросах при переработке твердых побочных продуктов животноводства

РЕЗЮМЕ

Вопрос получения достоверных данных по значениям выбросов парниковых газов в животноводстве становится всё более актуальным. Фактические замеры концентраций парниковых газов от побочных продуктов животноводства позволяют уточнить данные, подаваемые в Национальный доклад о кадастре.

Цель исследования — определение концентрации климатически активных веществ в выбросах от твердых побочных продуктов животноводства на экспериментальной лабораторной установке.

Все виды побочных продуктов животноводства для исследования были отобраны в крупных сельскохозяйственных организациях. В качестве исходного сырья были взяты побочные продукты животноводства в виде подстилочного куриного помета, твердой фракции свиного навоза и твердой фракции навоза КРС. Концентрации климатически активных веществ в выбросах исследовали на экспериментальной лабораторной установке, разработанной в ИАЭП — филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, имитирующей температурные режимы процесса компостирования и операции периодической аэрации. Концентрации CO₂, CH₄, H₂S, и NH₃ измеряли на четырехканальном газоанализаторе «ЭЛАН плюс». Концентрации закиси азота в газовой смеси определяли в лаборатории Агрофизического научно-исследовательского института в газовом хроматографе «Кристаллюкс-4000М». Полученные результаты были обработаны методом математической статистики. Результаты исследования показали потенциал созданной лабораторной установки для получения репрезентативных данных по эмиссии климатически активных веществ из побочных продуктов животноводства, сопоставимых с результатами других исследований в данной области.

Ключевые слова: парниковые газы, побочные продукты животноводства, концентрация, помет, навоз

Для цитирования: Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Базыкин В.И., Шалавина Е.В. Оценка концентраций климатически активных веществ в выбросах при переработке твердых побочных продуктов животноводства. *Аграрная наука*. 2025; 394(05): 141–147. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-141-147>

Estimation of concentrations of climate-active substances in emissions from processing of solid animal by-products

ABSTRACT

The need to obtain reliable data on greenhouse gas emissions from the livestock sector is becoming increasingly urgent. Actual measurement of gas concentrations from animal by-products will improve the accuracy of data submitted to the National Inventory Report.

The aim of the study was to determine the concentration of climatically active substances in emissions from solid by-products of animal husbandry at an experimental laboratory facility.

All types of animal by-products studied came from large agricultural organisations. The initial raw material for the study was animal by-products as bedding poultry manure, solid fraction of pig manure and solid fraction of cattle manure. Concentrations of climate-active substances in emissions were investigated on the experimental laboratory set-up designed at IEEP — branch of FSAC VIM, simulating temperature conditions of composting and periodic aeration operation. a four-channel ELAN plus gas analyser measured the concentrations of CO₂, CH₄, H₂S and NH₃. The concentration of nitrous oxide in the gas-air mixture was determined in the laboratory of the Agrophysical Research Institute using a “Kristalluks-4000M” gas chromatograph. The obtained results were analysed by the method of mathematical statistics. The results of the study proved the potential of the designed laboratory facility to provide a representative data on emissions of climate-active substances from animal by-products, comparable to the results of other studies in this field.

Key words: greenhouse gases, animal by-products, concentration, poultry manure, farm animal manure

For citation: Bryukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Bazykin V.I., Shalavina E.V. Estimation of concentrations of climate-active substances in emissions from processing of solid animal by-products. *Agrarian science*. 2025; 394(05): 141–147 (in Russian).. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-394-05-141-147>

Введение/Introduction

Сельскохозяйственное производство является неотъемлемой частью экономики Российской Федерации, обеспечивающей ее продовольственную безопасность [1–3]. Согласно опубликованному Национальному докладу о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом (далее — Кадастр парниковых газов), в 2022 году суммарные выбросы парниковых газов от аграрного сектора Российской Федерации составили 102 339 тыс. т CO₂-экв., что соответствует 55,8% уровня 1990 года (231 711 тыс. т CO₂-экв.)¹.

Вопрос получения достоверных данных по значениям выбросов парниковых газов становится всё более актуальным в современном мире [4, 5]. Сельскохозяйственная отрасль вносит свой вклад в нагрузку по эмиссиям от животноводства и растениеводства [6, 7], особенно от систем переработки навоза и помета [8, 9]. Грамотное проектирование технологий по переработке отходов позволит снизить эмиссии и уменьшить неприятные запахи [10, 11].

В целом в птицеводстве Российской Федерации увеличивается доля системы хранения помета «Сухое хранение» (по методике МГЭИК) — длительное выдерживание сухого помета на специализированной гидроизолированной площадке, заменяя технологию хранения «навалом» на полевой площадке, которая запрещена федеральным законом № 248-ФЗ [12].

В свиноводстве Российской Федерации идет тенденция к разделению свиного навоза на фракции, что приводит к росту объемов переработки жидкой фракции навоза методом длительного выдерживания и увеличением доли технологии пассивного компостирования. Применяемые технологии переработки навоза и помета влияют на эмиссии парниковых газов [12]. Необходимо разработать эффективные методы для максимально точного определения численных значений эмиссии парниковых газов от применяемых систем переработки навоза и помета.

Для проведения замеров и имитации реальных режимов переработки навоза и помета в

ИАЭП — филиале ФНАЦ ВИМ разработана экспериментальная установка. На ней возможно проведение замеров климатически активных веществ в режиме реального времени на различных видах навоза и помета. Установка позволяет имитировать следующие технологии переработки: длительное выдерживание твердого навоза (помета); длительное выдерживание жидкого навоза; активное компостирование; пассивное компостирование. В данном исследовании в качестве исходного материала выбран твердый ППЖ: ППЖ на основе подстилочного помета; ППЖ на основе твердой фракции свиного навоза; ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС.

Цель исследования — определение концентрации климатически активных веществ в выбросах от переработанного твердого побочного продукта животноводства на экспериментальной лабораторной установке.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Все виды побочных продуктов животноводства (ППЖ), подлежащие исследованию, были отобраны в крупных сельскохозяйственных организациях со специализированной площадки переработки. Время отбора проб — июнь 2024 года, место отбора проб — свиноводческий комплекс, птицефабрика и комплекс крупного рогатого скота. Все предприятия расположены в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО). В качестве исходного для исследования сырья были взяты ППЖ на основе твердой фракции свиного навоза, твердой фракции навоза КРС и подстилочного помета, перерабатываемые технологией активного компостирования (без добавления влагопоглощающего материала)². Все отобранные материалы были переданы в научно-исследовательскую лабораторию аналитических методов инженерной экологии Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Санкт-Петербург) для проведения лабораторных исследований (табл. 1).

Таблица 1. Характеристики исследуемого ППЖ

Table 1. Characteristics of animal-by-products under study

Вид переработанного ППЖ	Влажность, % ГОСТ 26713-85 ³	Углерод, % на н. в. ГОСТ 27980-88 ⁴	Общий азот, % на н. в. ГОСТ 26715-85 ⁵
ППЖ на основе подстилочного помета	68,21	12,1	0,69
ППЖ на основе твердой фракции свиного навоза	71,11	12,3	0,49
ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС	79,57	9,1	0,28

¹ Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2022 гг. М.: Росгидромет, ФГБУ «ИГКЭ». 2024; 406.

² Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета РД-АПК 1.10.15.02-17* <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/947/9476bd749ba5f126523c309546fe7e44.pdf?ysclid=m8cxf5qgj6897018537> (дата обращения: 17.03.2025).

³ ГОСТ 26713-85 Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка. <https://internet-law.ru/gosts/gost/29999/?ysclid=m8cxi12uscq146301893> (дата обращения: 17.03.2025).

⁴ ГОСТ 27980-88 Удобрения органические. Методы определения органического вещества. <https://internet-law.ru/gosts/gost/11598/> (дата обращения: 17.03.2025).

⁵ ГОСТ 26715-85 Удобрения органические. Методы определения общего азота. <https://internet-law.ru/gosts/gost/20140/> (дата обращения: 17.03.2025).

Исследование эмиссии проводили на экспериментальной лабораторной установке, разработанной в ИАЭП — филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (рис. 1), имитирующей естественные условия, характеризующие технологию активного аэробного компостирования с периодическим перемешиванием материала.

Лабораторная экспериментальная установка состояла из каркаса и герметичной камеры. Герметичная камера включала в себя верхнюю часть, в которой были размещены два миксера и инфракрасный нагреватель ЕСР-3 с термопарой (ООО «Полимернагрев», Россия), и нижнюю часть из нержавеющей стали, выполняющую функцию навозохранилища.

В рамках исследования были проведены замеры концентрации газов в соответствии с таблицей 2.

Исследования по определению концентрации закиси азота в газовой смеси проводили в лаборатории Агрофизического научно-исследовательского института в газовом хроматографе «Кристаллюкс-4000М». Отбор пробы закиси азота производили одновременно с отбором проб остальных газов с помощью шприца в подготовленном месте воздуховода. Пробу закачивали в 15 мл пенициллиновый флакон путем вытеснения из него воздуха. После этого флакон пломбировали алюминиевым колпачком и передавали на исследование в хроматографе.

Замеры концентрации газов в ППЖ осуществляли в четырех режимах:

- режим 1 — при достижении температуры ППЖ 24–27 °С;
- режим 2 — при достижении температуры ППЖ 28–30 °С;
- режим 3 — при достижении температуры ППЖ 41–42 °С (мезофильный период);
- режим 4 — при достижении температуры ППЖ 57–58 °С (термофильный период).

Режимы исследования обоснованы необходимостью выявления закономерностей выделения газов в зависимости от температуры материала и фазы компостирования.

При режиме 1 имитируется первая фаза активного компостирования, когда материал сгружен в бурты. На режиме 2 происходит саморазогрев материала в течение непродолжительного промежутка времени. На режимах 3 и 4 материал принудительно подогревают до необходимой температуры и периодически перемешивают для равномерного разогрева с целью имитации мезофильного и термофильного периодов соответственно.

Загрузку ППЖ в установку осуществляли партиями. Каждую партию перед загрузкой взвешивали на весах ВСН-15-0,5-3 ±5 г («Вессервис» («Невские весы», Россия, поверка 05.2024 г.) (рис. 2).

Постоянную имитацию среды при переработке методом компостирования внутри камеры обеспечивали за счет движения потоков воздуха

Рис. 1. Общий вид экспериментальной лабораторной установки. Фото ИАЭП. г. Санкт-Петербург. 2024 г.

Fig. 1. General view of the experimental laboratory set-up. Photo IEEP. St. Petersburg. 2024



Таблица 2. Проводимые замеры концентрации
Table 2. Measurements of concentrations

Вид переработанного ППЖ / метод определения значений	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	NH ₃	N ₂ O
	4-канальный газоанализатор «ЭЛАН плюс» (ООО «НПП «ГазоАналит», Россия)				Газовый хроматограф «Кристаллюкс-4000М» (ООО «Техногарант-ТЦ», Россия)
ППЖ на основе подстилочного помета	+	+	+	+	+
ППЖ на основе твердой фракции свиного навоза	+	+	+	+	–
ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС	+	+	+	+	+

Рис. 2. Процесс взвешивания переработанного ППЖ и загрузки его в камеру. Фото ИАЭП. г. Санкт-Петербург. 2024 г.

Fig. 2. Weighing of processed animal by-product and loading it into the chamber. Photo IEEP. St. Petersburg. 2024



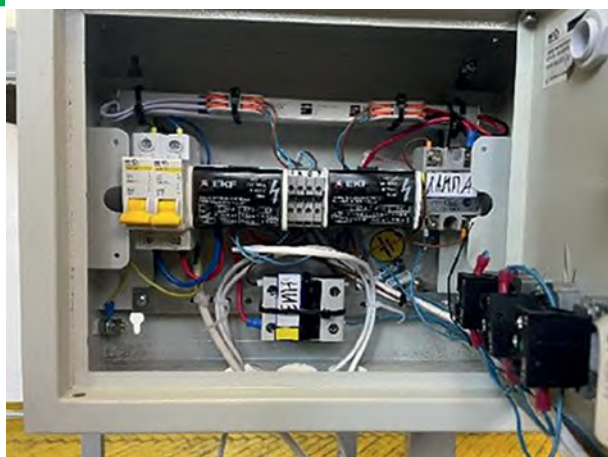
посредством приточного и вытяжного вентиляторов, которые были оснащены частотными преобразователями для задания необходимой частоты вращения. Это обеспечивало установку, поддержание и контроль необходимой скорости движения воздуха внутри камеры. Общий вид шкафа управления с выключателями нагревательных элементов и регуляторами скорости вращения вентиляторов представлен на рисунке 3.

Частота вращения вентиляторов была установлена исходя из условия обеспечения необходимого воздушного потока, сопоставимого со среднегодовой скоростью ветра в регионах расположения сельскохозяйственных организаций, предоставивших материал для исследований.

Замеры концентраций всех газов (табл. 2) осуществляли в трех повторностях для каждого из

Рис. 3. Общий вид шкафа управления экспериментальной установкой. Фото ИАЭП. г. Санкт-Петербург. 2024 г.

Fig. 3. General view of the control cabinet of the experimental set-up. Photo IEEP. St. Petersburg. 2024



четырёх режимов. Измерения проводили в соответствии с общепринятыми методиками⁶⁻⁹ и руководством по эксплуатации¹⁰. Через отверстие в вытяжном трубопроводе, прикрепленном к верхней части герметичной камеры, в трубопровод вводили пробоотборный зонд ПЗ 1.2 (ООО «НИКИ МЛТ+», Россия), соединенный с газоанализатором посредством второпластовых трубок (рис. 4). Переработанный ППЖ не вступал в реакцию с применяемыми материалами, что способствовало получению адекватных результатов исследования.

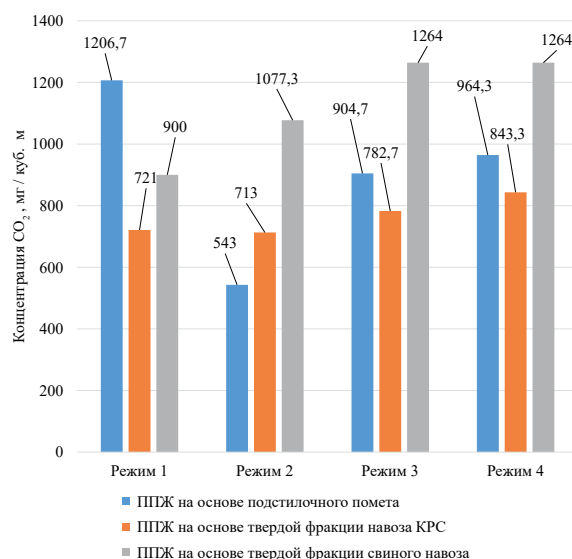
Полученные данные были обработаны методами математической статистики в программе Microsoft Excel 2019 (США).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Полученные результаты исследований по обращению с ППЖ на основе подстилочного помета и твердой фракции свиного навоза справедливы для всех природно-климатических зон РФ. Это обусловлено тем, что в промышленном свиноводстве и птицеводстве применяются типовые технологии содержания и кормления животных и птицы, вследствие чего образующие ППЖ в разных регионах имеют сопоставимые характеристики. Что касается ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС, то в зависимости от региона РФ применяются различные технологии содержания (выгульная и безвыгульная системы

Рис. 4. Результаты замера концентрации CO_2 в эмиссиях от ППЖ, перерабатываемом технологией активного компостирования

Fig. 4. Measurement results of CO_2 concentration in emissions from animal by products processed by active composting



содержания) и рационы кормления животных. В связи с этим образующий ППЖ по своим характеристикам может отличаться в зависимости от региона. Следовательно, полученные результаты по обращению с ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС можно экстраполировать на регионы с преобладанием безвыгульной системы содержания КРС.

Результаты замера CO_2 , CH_4 , H_2S , и NH_3 и N_2O представлены на рисунках 4–8. Средние концентрации веществ в помещении при исследовании ППЖ представлены в таблице 3.

Результаты замеров CO_2 показывают, что наибольшую концентрацию (1206,7 мг/м³) наблюдали через 1 час после загрузки ППЖ на основе подстилочного куриного помета (режим 1). В целом для ППЖ на основе подстилочного куриного помета и твердой фракции навоза КРС при разогреве материала концентрация газов сначала снижалась

Таблица 3. Средние концентрации веществ в помещении нахождения лабораторной установки при исследовании ППЖ

Table 3. Average concentrations of substances in the room where the experimental laboratory set-up is located during the study of animal by-products

Вид переработанного ППЖ / газ	CO_2 , мг/м³	CH_4 , %	H_2S , мг/м³	NH_3 , мг/м³
ППЖ на основе подстилочного помета	$475,3 \pm 67,8$	$0,03 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$	$1,8 \pm 0,5$
ППЖ на основе твердой фракции свиного навоза	718 ± 5	$0,02 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,04$	$1,83 \pm 0,12$
ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС	$449,5 \pm 92,5$	$0,03 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,05$	$1,18 \pm 0,27$

⁶ ГОСТ 13320-81 Газоанализаторы промышленные автоматические. Общие технические условия. <https://internet-law.ru/gosts/gost/30223/?ysclid=m8scu1eg1ng820992071> (дата обращения: 24.03.2025).

⁷ ГОСТ 17.2.4.08 Охрана природы. Атмосфера. Методы определения влажности газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. <https://internet-law.ru/gosts/gost/10715/?ysclid=m8mwwsd7z6843413802> (дата обращения: 24.03.2025).

⁸ ГОСТ Р ЕН 15259 Качество воздуха. Выбросы стационарных источников. Требования к выбору измерительных секций и мест измерений, цели и плану измерений и составлению отчета. <https://internet-law.ru/gosts/gost/65986/?ysclid=m8mwyqcsd846981615> (дата обращения: 24.03.2025).

⁹ ГОСТ 17.2.4.06 Охрана природы. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения. <https://internet-law.ru/gosts/gost/19261/?ysclid=m8mwyvshoy387350265> (дата обращения: 24.03.2025).

¹⁰ Газоанализаторы «ЭЛАН плюс». <https://ekosf.ru/wp-content/uploads/2020/08/elan-plyus-re-2021.pdf>

(до 543 мг/м³ и 713 мг/м³ соответственно), а при нагреве сырья более 55 °С повышалась до 964 мг/м³ и 843 мг/м³ соответственно. Замеры концентрации CO₂ от ППЖ на основе твердой фракции свиного навоза показали, что в процессе нагрева сырья концентрации возрастали с 900 до 1264 мг/м³.

Результаты замера CH₄ показывают, что для ППЖ на основе подстильного помета с повышением температуры концентрация в эмиссии падает с 0,08 до 0,03%. Для ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС и твердой фракции свиного навоза концентрация в эмиссии возрастает, соответственно, с 0,023% и 0,02% до 0,03%.

Результаты замера H₂S показывают, что его концентрация растет с подъемом температуры сырья: на 116,7% — для ППЖ на основе подстильного помета, на 67,9% — для ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС, на 69,9% — для ППЖ на основе твердой фракции свиного навоза.

Результаты замера NH₃ показывают, что для ППЖ на основе подстильного помета концентрации при режиме 2 снижаются с 33,97 до 15,93 мг/м³, а потом возрастают до 42,5 мг/м³. Концентрации в эмиссии от ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС и твердой фракции свиного навоза с разогревом

сырья растут с 11,1 до 16,2 мг/м³ и с 7,72 до 20,1 мг/м³ соответственно.

Концентрация N₂O для переработанного ППЖ в основе подстильного помета выше концентрации в помещении проведения исследования на режимах 1, 2, 3 и 4 на величину в 63%, 53%, 81% и 169% соответственно. В целом при обработке результатов исследований было выявлено, что в зависимости от режима исследования и изменения температуры материала наиболее интенсивно изменялись показания концентрации H₂S и NH₃.

Исследования показали, что после загрузки сырья (подстильного помета, твердой фракции навоза КРС и твердой фракции свиного навоза) через 1 час концентрации всех газов снижаются, далее по мере разогрева сырья (увеличение температуры сырья) значения концентраций для всех исследуемых газов увеличиваются. Это подтверждает тот факт, что при естественном саморазогреве сырья в процессе компостирования концентрации газов увеличиваются.

Учеными из США были проведены исследования по определению эмиссии закиси азота от почв после внесения на них переработанного свиного навоза [13]. Результаты исследования показали, что в зависимости от времени после внесения

Рис. 5. Результаты замера концентрации CH₄ в эмиссиях от ППЖ, перерабатываемом технологией активного компостирования

Fig. 5. Measurement results of CH₄ concentration in emissions from animal by-products processed by active composting

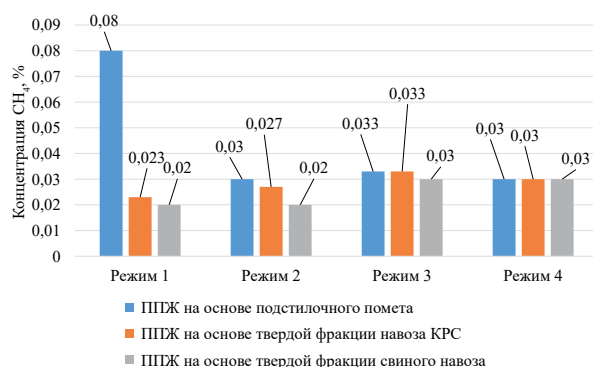


Рис. 6. Результаты замера концентрации H₂S в эмиссиях от ППЖ, перерабатываемом технологией активного компостирования

Fig. 6. Measurement results of H₂S concentration in emissions from animal by-products processed by active composting

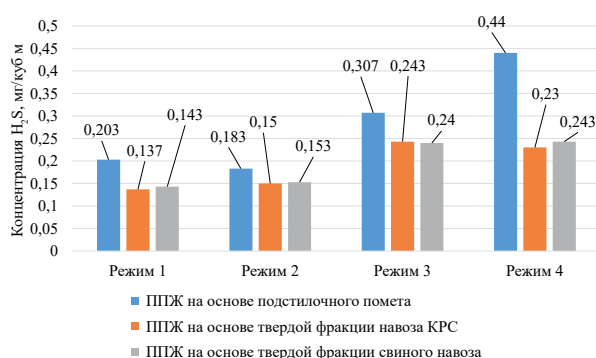


Рис. 7. Результаты замера концентрации NH₃ в эмиссиях от ППЖ, перерабатываемом технологией активного компостирования

Fig. 7. Results of NH₃ concentration measurement in emissions from animal by-products processed by active composting

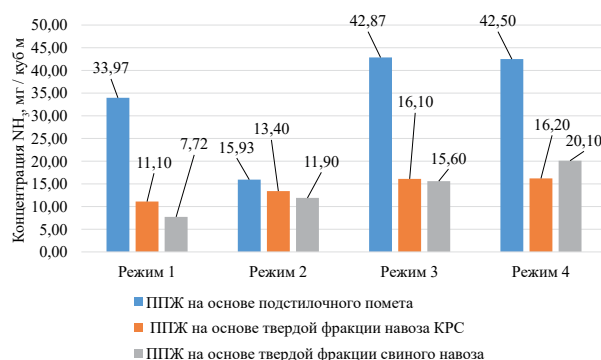
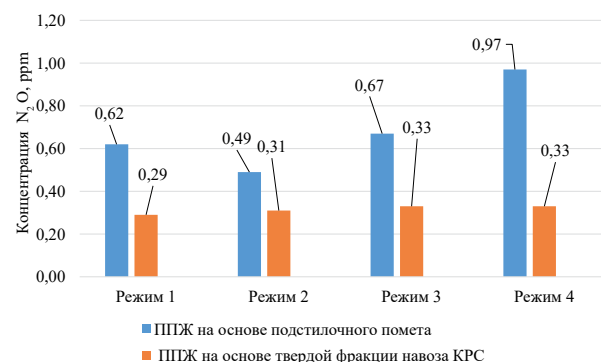


Рис. 8. Результаты замера N₂O в эмиссиях от ППЖ, перерабатываемом технологией активного компостирования

Fig. 8. Results of N₂O measurement in emissions from animal by-products processed by active composting



(0,1–0,8 ч.), концентрация закиси азота в эмиссиях менялась от 0,4 до 2,3 ppm. Значения авторов находятся в диапазоне 0,29–0,97 ppm.

При сравнении результатов по концентрации аммиака наблюдали сходимость значений. Учеными из Нидерландов были проведены исследования по оценке эмиссии аммиака после внесения переработанного навоза в почву [14]. В зависимости от высоты замера (от 0 до 4 м над уровнем почвы) концентрации аммиака составили от 17 до 68 мг/м³. В исследованиях авторов концентрация аммиака для ППЖ на основе твердой фракции навоза КРС составила $2,19 \pm 0,71$ мг/м³, в аналогичных исследованиях — от 2,4 до 4,8 мг/м³ [8, 15].

Учеными из Малайзии были проведены исследования по определению концентраций метана и углекислого газа от свежего навоза коров [16]. Концентрация метана в эмиссиях от навоза коров (возраст коровы 10 лет) в зависимости от длительности проведения исследования (от 0 до 8 сут.) составила от 0 до 3,02%. В исследованиях авторов концентрация метана находится в диапазоне $0,02 \pm 0,01\%$. В целом имеется значительный разброс по полученным результатам.

Выводы/Conclusions

Определены концентрации климатически активных веществ в выбросах от твердых побочных продуктов животноводства (подстилочного помета, твердой фракции навоза КРС и твердой фракции свиного навоза) на экспериментальной лабораторной установке: концентрация CO₂ находилась в диапазоне от 543 до 1264 мг/м³, концентрация CH₄ — в диапазоне 0,02–0,033%, концентрация H₂S — в диапазоне 0,137–0,44 мг/м³, концентрация NH₃ — в диапазоне 7,72–42,87 мг/м³, концентрация N₂O — в диапазоне 0,29–0,97 ppm.

В результате сопоставления полученных данных на разработанной лабораторной установке, позволяющей имитировать реальные условия переработки ППЖ, с результатами аналогичных исследований установлено, что были получены сопоставимые данные. Следовательно, данную лабораторную установку можно использовать для исследования других видов ППЖ и набора репрезентативных данных, позволяющих впоследствии уточнить национальные расчетные коэффициенты и рассчитывать прогнозные эмиссии от технологий переработки ППЖ.

Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках рабочей программы ИАЭП — филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ № FGUN-2025-0010 «Разработать энергоресурсосберегающие машинные технологии и цифровые системы мониторинга и управления для экологически безопасного производства сельскохозяйственной продукции».

FUNDING

The study was performed within the framework of the Working Program of IEEP — branch of FSAC VIM No. FGUN-2025-0010 “To develop energy and resource saving machine-based technologies and digital monitoring and control systems for environmentally safe agricultural production”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гузь Л.В., Петров И.Б. Об использовании отходов животноводства при осуществлении экономической деятельности. *Твердые бытовые отходы*. 2021; (1): 56–59. <https://elibrary.ru/disdvq>
2. Кузьмина Т.Н., Мишуров Н.П., Брюханов А.Ю., Кузьмин В.Н., Свиначев И.Ю., Малородов В.В. Состояние производства технологического оборудования, рекомендуемого для эксплуатации в случае применения наилучших доступных технологий при интенсивном разведении свиней и птицы. Аналитический обзор. М.: Росинформагротех. 2023; 96. <https://elibrary.ru/sbobep>
3. Липка О.Н., Романовская А.А., Семенов С.М. Прикладные аспекты адаптации к изменениям климата в России. *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020; (1): 65–90. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-1-65-90>
4. Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D., Trunov A.A., Vertyankina V.Y., Karaban R.T. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2020; 25(4): 661–687. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09885-2>
5. Genstwa N., Zmysłona J. Greenhouse Gas Emissions Efficiency in Polish Agriculture. *Agriculture*. 2024; 14(1): 56. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010056>
6. Джаббаров Н.И., Мишанов А.П., Добринов А.В. Прогнозирование выбросов парниковых газов в растениеводстве от уровня применяемых технологий. *АгроЭкоИнженерия*. 2024; (1): 70–82. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82>

REFERENCES

1. Guz L.V., Petrov I.B. On the use of livestock waste in economic activities. *Tverdye bytovyye otkhody*. 2021; (1): 56–59 (in Russian). <https://elibrary.ru/disdvq>
2. Kuzmina T.N., Mishurov N.P., Bryukhanov A.Yu., Kuzmin V.N., Svinarev I.Yu., Malorodov V.V. Production status of technological equipment recommended for use in case the best available techniques are applied in intensive pig and poultry breeding. Analytical review. Moscow: *Rosinformagroteh*, 2023; 96 (in Russian). <https://elibrary.ru/sbobep>
3. Lipka O.N., Romanovskaya A.A., Semenov S.M. Applied aspects of adaptation to climate change in Russia. *Fundamental and Applied Climatology*. 2020; (1): 65–90 (in Russian). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2020-1-65-90>
4. Romanovskaya A.A., Korotkov V.N., Polumieva P.D., Trunov A.A., Vertyankina V.Y., Karaban R.T. Greenhouse gas fluxes and mitigation potential for managed lands in the Russian Federation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2020; 25(4): 661–687. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09885-2>
5. Genstwa N., Zmysłona J. Greenhouse Gas Emissions Efficiency in Polish Agriculture. *Agriculture*. 2024; 14(1): 56. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010056>
6. Dzhabborov N. I., Mishanov A.P., Dobrinov A.V. Forecasting of greenhouse gas emissions in crop production depending on applied technology level. *AgroEcoEngineering*. 2024; (1): 70–82 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-1118-70-82>

7. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Влияние системы удаления навоза на концентрацию аммиака в коровниках с беспривязным содержанием. *АгроЭкоИнженерия*. 2024; (2): 104–117. <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116>
8. Holly M.A., Larson R.A., Powell J.M., Ruark M.D., Aguirre-Villegas H. Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2017; 239: 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>
9. Брюханов А.Ю., Васильев Э.В., Шалавина Е.В., Уваров Р.А., Субботин И.А. Метод решения экологических проблем при обращении с навозом и пометом. *Молочнохозяйственный вестник*. 2017; (3): 84–96. <https://elibrary.ru/zmnxsx>
10. Пилип Л.В. Метод очистки воздуха от запахообразующих веществ свиноподкомплексов. *АгроЭкоИнженерия*. 2019; (4): 137–146. <https://elibrary.ru/ucgzay>
11. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В. Методический подход к выбору и проектированию отстойников жидкой фракции свиного навоза. *Инновации в сельском хозяйстве*. 2013; (2): 17–21. <https://elibrary.ru/qivvel>
12. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Прогнозное распределение технологий переработки свиного навоза и куриного помета в РФ для принятия мер по снижению выбросов парниковых газов. *Аграрная наука*. 2024; (7): 160–165. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-384-7-160-165>
13. Maurer D.L., Koziel J.A., Bruning K. Field scale measurement of greenhouse gas emissions from land applied swine manure. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2017; 11: 1. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0915-9>
14. Goedhart P.W., Mosquera J., Huijsmans J.F.M. Estimating ammonia emission after field application of manure by the integrated horizontal flux method: a comparison of concentration and wind speed profiles. *Soil Use and Management*. 2020; 36(2): 338–350. <https://doi.org/10.1111/sum.12564>
15. Вторый С.В., Ланцова Е.О. Влияние температуры воздуха и влажности навоза на интенсивность эмиссии газов из навоза крупного рогатого скота. *Региональная экология*. 2015; (5): 43–45. <https://elibrary.ru/vdwgon>
16. Hanafiah M.M., Ibraheem A.J., Razman K.K. Emissions of carbon dioxide and methane from dairy cattle manure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 880: 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012037>

ОБ АВТОРАХ

Александр Юрьевич Брюханов

доктор технических наук
член-корреспондент РАН, директор
sznii@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>

Эдуард Вадимович Васильев

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
sznii6@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

Валентин Игоревич Базыкин

научный сотрудник
valentin-bazykin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6417-6433>

Екатерина Викторовна Шалавина

кандидат технических наук, старший научный сотрудник
shalavinaev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>
Тел. +7 (962) 715-10-70

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) — филиал Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Филитовское шоссе, 3, пос. Тярлево, Санкт-Петербург, 196634, Россия

7. Vtoryi V.F., Vtoryi S.V. Effect of manure removal system on ammonia concentration in loose housing barns. *AgroEcoEngineering*. 2024; (2): 104–117 (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-104-116>

8. Holly M.A., Larson R.A., Powell J.M., Ruark M.D., Aguirre-Villegas H. Greenhouse gas and ammonia emissions from digested and separated dairy manure during storage and after land application. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2017; 239: 410–419. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.007>

9. Bryukhanov A.Yu., Vasiliev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A., Subbotin I.A. Method of environmental problem solution in manure management. *Molochnokhoyzaistvenny vestnik*. 2017; (3): 84–96 (in Russian). <https://elibrary.ru/zmnxsx>

10. Pilip L.V. Method of air cleaning from odor-forming substances originating from pig complexes. *AgroEcoEngineering*. 2019; (4): 137–146 (in Russian). <https://elibrary.ru/ucgzay>

11. Bryukhanov A.Yu., Shalavina E.V. Methodical approach to the selection and design of settling tanks of liquid fraction of pig manure. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2013; (2): 17–21 (in Russian). <https://elibrary.ru/qivvel>

12. Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vasiliev E.V. Forecast distribution of technologies for processing pig and poultry manure in the Russian Federation to take measures for GHG reduction. *Agrarian science*. 2024; (7): 160–165 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2024-384-7-160-165>

13. Maurer D.L., Koziel J.A., Bruning K. Field scale measurement of greenhouse gas emissions from land applied swine manure. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2017; 11: 1. <https://doi.org/10.1007/s11783-017-0915-9>

14. Goedhart P.W., Mosquera J., Huijsmans J.F.M. Estimating ammonia emission after field application of manure by the integrated horizontal flux method: a comparison of concentration and wind speed profiles. *Soil Use and Management*. 2020; 36(2): 338–350. <https://doi.org/10.1111/sum.12564>

15. Vtoryi S.V., Lantsova E.O. The effect of air temperature and manure humidity on the intensity of gas emission from cattle manure. *Regional ecology*. 2015; (5): 43–45 (in Russian). <https://elibrary.ru/vdwgon>

16. Hanafiah M.M., Ibraheem A.J., Razman K.K. Emissions of carbon dioxide and methane from dairy cattle manure. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 880: 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012037>

ABOUT THE AUTHORS

Alexander Yuryevich Briukhanov

Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director
sznii@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>

Eduard Vadimovich Vasiliev

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher
sznii6@ya.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>

Valentin Igorevich Bazykin

Researcher
valentin-bazykin@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-6417-6433>

Ekatereina Viktorovna Shalavina

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
shalavinaev@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>
Phone +7 (962) 715-10-70

Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 3 Filitovskoe highway, village Tyarlevo, St. Petersburg, 196634, Russia