

УДК 631.95

DOI 10.18286/1816-4501-2023-3-200-206

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ БИОТЕРМИЧЕСКОЙ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ СВИНОВОДЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ОЦЕНКОЙ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ВЫБРОСОВ

**Васильев Эдуард Вадимович**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем

**Максимов Дмитрий Анатольевич**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем

**Шалавина Екатерина Викторовна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

196634 Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, 3. Телефон: +7 (812) 476-86-02. Email: nij@sznii.ru.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, побочные продукты животноводства, биоферментация, технология, выбросы, климатически активные вещества.

Развитие животноводства и его интенсификация обострили проблему утилизации образующихся при производстве органических отходов. Имеется Федеральный закон № 248 от 14.07.2022, определяющий понятие побочные продукты животноводства, такие как навоз, помёт, подстилка и стоки при их вовлечении в производственный процесс, в том числе по воспроизводству плодородия почв. Получение высококачественных органических удобрений в короткие сроки возможно путём аэробной биоферментации таких продуктов в установках закрытого типа, защищенных от воздействия неуправляемых внешних факторов. Нами проведены экспериментальные исследования на технологической линии с биоферментатором барабанного типа по переработке смеси органических отходов свиноводческого комплекса. Для приготовления смеси использованы твёрдые фракции навоза после шнекового сепаратора – 60 % и декантерной центрифуги – 32 %, а также образующиеся на предприятии отходы от механической очистки зерна – 8 %. Установленный режим работы установки: периодичность аэрации – 5 мин/ч; расход воздуха – 11,3 м<sup>3</sup>/ч на 1,7 т смеси; интервал вращения барабана – каждые 12 часов по 3 оборота. При заданных составе смеси и режимах переработки отмечено активное и устойчивое протекание биоферментационного процесса. Температура не опускалась ниже 55 °С. Наиболее активно процесс распада органического вещества протекал со вторых по пятые сутки. За весь процесс распад сухого вещества составил 5 %. При принятом составе смеси и режимах переработки возможный выброс углекислого газа составляет 60 кг/т, а также происходят потери азота в виде газового выброса порядка 0,6 кг/т обрабатываемого материала.

#### Введение

В России ежегодно образуется более 600 млн. т навоза и помета. Получаемый побочный продукт животноводства (ППЖ) имеет высокое содержание биогенных элементов, но в силу низкого уровня его переработки и использования (по данным официальной статистики используется в качестве органических удобрений менее 50 %) ежегодные потери питательных элементов составляют не менее 2,2 млн. т азота (N) и 0,36 млн. т фосфора (P). При этом стоит от-

метить, что в силу интенсивного использования почв происходит ухудшение их качества (недостаток питательных элементов составляет более 6000 тыс. т действующего вещества в год, снижается содержание гумуса в почве). Основным способом улучшения плодородия почв всегда являлось применение органических удобрений. Непосредственное использование навоза и помета не позволяет полностью использовать их имеющийся потенциал и может нанести вред окружающей среде. Для решения, в том числе

и данной проблемы, 1.03.2023 г. вступил в силу Федеральный закон № 248 «О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». Его цель - повышение эффективности вовлечения ППЖ, определяемых как вещества, образуемые при содержании животных (навоз, помёт, подстилка и стоки), в сельскохозяйственное производство, в том числе для обеспечения воспроизводства плодородия почвы.

Производство качественных органических удобрений из ППЖ возможно путём биотермической аэробной ферментации, представляющей собой экзотермический процесс биологического окисления, где органический субстрат подвергается биодеградации смешанной популяцией микроорганизмов. При биотермической ферментации интенсифицируется процесс минерализации исходного субстрата, повышается биосинтез новых биологически активных соединений, влияющих на функциональные свойства конечных продуктов [1 - 7].

При ферментации органики протекают процессы дезаминирования и декарбоксилирования. В результате данных реакций выделяются соответственно аммиак и диоксид углерода, а вместе с этим и другие загрязняющие окружающую среду вещества [8 - 13]. Одновременно происходящие биотермические и биолитические процессы обеззараживают ППЖ от патогенных и условно-патогенных микроорганизмов, происходит снижение содержания неэкстрагируемых органических веществ, фульвокислот и увеличивается содержание гумуса, который образуется только в аэробных условиях. При использовании органического удобрения, получаемого в результате данных процессов, улучшаются свойства почв, ускоряется обмен питательных

веществ между корнями и почвой, что способствует повышению урожайности и качества получаемой продукции, поэтому аэробный способ более предпочтителен по сравнению с анаэробным сбраживанием, где часть органического вещества и питательных элементов теряется при выработке газа.

Одно из главных требований при переработке ППЖ в органические удобрения - добиться максимального сохранения азота, фосфора и других минеральных соединений, которые должны остаться в получаемом удобрении.

Анализ технологий переработки ППЖ показал, что в настоящее время 48 % предприятий, работающих с крупным рогатым скотом (КРС), получают жидкий навоз, из них 21 % использует технологию разделения навоза на фракции с последующей отдельной переработкой твердой и жидкой фракций. На свиноводческих предприятиях с бесподстилочным содержанием также применяют технологию разделения ППЖ на фракции с их отдельной переработкой [14].

Несмотря на высокую эффективность процесса аэробной биоферментации и получения в результате высококачественных органических удобрений, данный процесс негативно воздействует на окружающую среду из-за выброса климатически активных веществ. Целью данной работы стало исследование технологии переработки органических отходов свиноводческих комплексов в биоферментационной установке барабанного типа с оценкой степени её негативного влияния на окружающую среду.

#### **Материалы и методы исследований**

В качестве исследуемых компонентов использованы органические отходы свиноводческого комплекса, расположенного в Ленинградской области. На предприятии используется



**Рис. 1 – Компоненты ферментируемой смеси: 1 – твердая фракция свиного навоза после шнекового сепаратора; 2 – твердая фракция свиного навоза после декантерной центрифуги; 3 – отходы механической очистки зерна**



**Рис. 2 – Общий вид лабораторного биоферментатора барабанного типа**

получившая широкое распространение технология переработки жидкого навоза с разделением его на жидкую и твёрдую фракции.

В процессе сепарирования навоза двумя способами на предприятии образуется твердая фракция навоза после шнекового сепаратора и твердая фракция навоза после декантерной центрифуги. При переработке растениеводческой продукции в хозяйстве образуются отходы от механической очистки зерна. Общий вид побочных продуктов животноводства, используемых в качестве компонентов для биоферментации, представлен на рисунке 1.

Процесс биоферментации смеси исследовали в лабораторной биоферментационной установке барабанного типа (рис.2). Исходные компоненты смеси: твердая фракция свиного навоза после шнекового сепаратора – 60 %; твердая фракция свиного навоза после декантерной центрифуги – 32 %; отходы от механической очистки зерна – 8 %. Подтверждение, что характеристики данной смеси позволяют запустить процесс биоферментации и обеспечить необходимый температурный режим, получено во время предварительных поисковых исследований [15 - 17].

Процесс биоферментации осуществлялся в течение 7 суток после достижения температурного порога в +55 °С, что обеспечивало переработку и гарантированное обеззараживание смеси на основе побочных продуктов свиноводческого комплекса.

Был установлен следующий режим работы установки: периодичность аэрации 5 мин./ч; расход воздуха – 11,3 м<sup>3</sup>/ч на 1,7 т смеси. Барабан вращали каждые 12 ч на 3 оборота.

Массу перерабатываемой смеси контролировали с помощью весовой системы, состоя-

щей из 4 тензометрических датчиков, установленных на биоферментаторе. Пробы на анализ отбирали ежедневно в регламентированное время. Все измерения осуществляли с трехкратной повторностью.

В процессе анализа проб определяли влажность; общий азот ( $N_{\text{общ}}$ ), мг/кг и зольность, %. Пробы анализировали в научно-исследовательской лаборатории аналитических методов инженерной экологии ИАЭП – филиале ФГБНУ ФНАЦ ВИМ с применением соответствующего аналитического оборудования и по методикам, определяемым ГОСТом.

#### **Результаты исследования**

При заданном режиме работы биоферментационной установки спустя 24 ч после начала эксперимента температура смеси достигла 22,8 °С; через 48 ч - повысилась до 48,5 °С, а через 65 ч был достигнут заданный уровень в 55 °С, после чего температура не опускалась ниже этого значения.

В процессе ферментации происходило изменение как массы, так и влажности перерабатываемой смеси. В результате микробиологических процессов происходило разложение органического вещества, о чём говорит снижение массы сухого вещества перерабатываемой смеси. Полученные данные представлены в таблице 1.

Анализ полученных данных показал, что наиболее активно процессы распада органического вещества шли в период 2...5 суток (рис. 3).

За весь процесс масса сухого вещества снизилась на 5 %. С учётом зольности исходной смеси, которая составила 10,6 %, массовая доля органического вещества в пересчете на углерод  $C_{SM}$ , % определена по формуле 1 в соответствии с ГОСТ 27980-88 «Удобрения органические. Ме-

Изменение характеристик смеси в процессе биоферментации

Технологический этап	Масса М, кг	Стандартное отклонение массы $\sigma_{M'}$ кг	Влажность W, %	Стандартное отклонение влажности $\sigma_{W'}$ %	Содержание общего азота $N_{\text{общ}'}$ мг/кг	Стандартное отклонение содержания общего азота $\sigma N_{\text{общ}'}$ мг/кг	Масса сухого вещества $M_{\text{св}'}$ кг
Загруженная смесь	1287	0	68,7	0,096	7128	84,43	402,83
1 сутки биоферментации	1277,7	5,56	68,6	0,249	7156,7	84,6	401,20
2 сутки биоферментации	1269,3	4,64	68,4	0,047	7043,3	83,92	401,10
3 сутки биоферментации	1248,7	2,62	68,2	0,016	7114	84,34	397,09
4 сутки биоферментации	1214	4,55	68,3	0,016	7276,3	85,3	384,84
5 сутки биоферментации	1195	4,08	67,9	0,002	7306,7	85,48	383,60
6 сутки биоферментации	1184,7	7,13	67,7	0,002	7356	85,77	382,66
7 сутки биоферментации	1176,3	6,55	67,5	0,009	7140,7	84,5	382,30

тоды определения органического вещества».

$$C_{CM} = (100 - A) \cdot 0,5, \quad (1)$$

где  $A$  – массовая доля золы, %; 0,5 – коэффициент перевода в углерод.

$$C_{CM} = (100 - 10,6) \cdot 0,5 = 44,7 \%$$

При пересчёте на всю массу сухого вещества смеси содержание углерода составило 180 кг. Зольность конечного продукта составила 17 %. Массовая доля органического вещества в пересчете на углерод  $C_{CM}$  в процентах соответственно стала

$$C_{CM} = (100 - 17) \cdot 0,5 = 41,5 \%$$

При пересчёте на всю сухую массу конечного продукта содержание углерода стало 159 кг.

Таким образом, за время ферментации произошла потеря примерно 21 кг углерода за счёт его окисления до углекислого газа, что являлось одним из источников энергии для повышения температуры и эффективного протекания процесса биоферментации. Выброс углекислого газа за весь цикл соответственно составил 77 кг. В пересчёте на тонну перерабатываемой смеси при принятых режимах выброс углекислого газа за весь цикл переработки составит 60 кг/т или 30 м<sup>3</sup>/т.

По результатам лабораторных исследований конечный продукт (компост) после биоферментации соответствовал действующим требованиям к органическим удобрениям.

Пересчёт отношения углерода к азоту показал довольно узкое его значение  $C/N \approx 20$ , что обусловило довольно значительные потери азота. На рисунке 4 представлен график снижения содержания азота за время биоферментации.

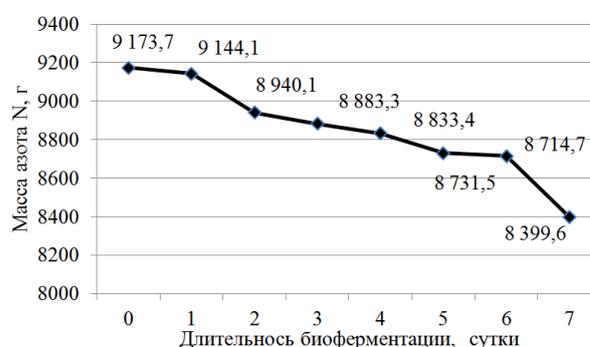


Рис. 4 – Изменение массы азота в смеси при биоферментации

Потери азота происходили в виде газовых выбросов аммиака, окислов, закиси и свободного азота. Потери азота при принятых режимах обработки за весь цикл соответственно составили 0,8 кг или 0,6 кг/т переработанной смеси.

#### Обсуждение

Учеными различных стран было усвоено, что ферментация является основой современной промышленной биотехнологии, которая обеспечивает качество получаемого конечного продукта [18 - 21].

Проведённые исследования по переработке ППЖ свиноводческого комплекса методом аэробной биоферментации в установке барабанного типа показали эффективность данной технологии. При принятых составе ферментируемой смеси и режиме работы установки произошёл ее быстрый (в течение суток) выход на рабочий режим и его устойчивое протекание, что обеспечило относительно короткий срок переработки и гарантированное качество готового органического удобрения. Полученные результаты явились продолжением исследований

по данной проблеме [1 - 13, 18 - 21], в которых были раскрыты особенности микробиологических процессов, происходящих при переработке, и обеспечения качества получаемых органических удобрений.

Результаты оценки воздействия экологического аспекта переработки ППЖ показали, что данный процесс оказывает влияние на состояние окружающей среды, как и отрасль животноводства в целом [22].

#### **Заключение**

Перспективным направлением производства высококачественных органических удобрений является биотермическая аэробная ферментация. Использование биоферментаторов закрытого типа, защищенных от воздействия неуправляемых внешних факторов, способно существенно повысить качество конечного продукта и снизить сроки их переработки до 5 суток в отличие от ферментации на открытых площадках, где переработка ППЖ длится месяцами.

Процесс аэробной биоферментации является источником выброса климатически активных веществ, поэтому требуется контролировать его протекание с целью управления как качеством производимого продукта, так и степени его воздействия на окружающую среду.

Проведённые исследования с ППЖ свиноводческого комплекса подтвердили эффективность предлагаемой технологии на основе установки с биоферментатором барабанного типа. Распад сухого вещества смеси за весь цикл процесса составил 5 %. При принятом составе смеси и режимах обработки выброс углекислого газа составляет примерно 60 кг/т, а также происходят потери азота в виде газового выброса порядка 0,6 кг/т обрабатываемого материала. Полученные данные могут быть использованы для оценки выброса климатически активных веществ от объектов ферментации ППЖ и для проектирования систем очистки выбросов.

#### **Библиографический список**

1. Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust / G.F. Huang, Q.T. Wu, J.W. Wong, B.B. Nagar // *Bioresource Technology*. 2006. № 97. Pages 1834-1842.
2. Effects of the C/N ratio on the microbial community and lignocellulose degradation, during branch waste composting / Y. Xie, L. Zhou, J. Dai, J. Chen, X. Yang, X. Wang, Z. Wang, L. Feng // *Bioprocess and Biosystems Engineering*.- 2022.- № 45.- P. 1163–1174.
3. Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials / X. Wang, H. Cui, J. Shi, X. Zhao, Y. Zhao, Z. Wei // *Bioresource Technology*. - 2015. - № 98.- P. 395-402.
4. Assessment of humification degree of dissolved organic matter from different composts using fluorescence spectroscopy technology / Z. Wei, X. Zhao, C. Zhu, B. Xi, Y. Zhao, X. Yu // *Chemosphere*. - 2014. - № 95. – P. 261-267.
5. Effect of Microbes in Enhancing the Composting Process: A Review / R. Deblina, K. Sunil, N. Suchandra, A. Osman // *International Journal of Plant & Soil Science*. 2022. № 23. Pages 630-641.
6. Результаты практического использования удобрений из куриного помета при возделывании озимой пшеницы / Ф. С. Сибгатуллин, З. М. Халиуллина, А. М. Петров, А. С. Ганиев // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2021. – Т. 16. – № 1(61). – С. 51-56. – DOI 10.12737/2073-0462-2021-51-56. – EDN PVOEGE.
7. Использование удобрений из куриного помета для выращивания органической продукции / А. С. Ганиев, Ф. С. Сибгатуллин, Б. Г. Зиганшин [и др.] // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2022. – Т. 17. – № 1(65). – С. 9-14. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-9-14. – EDN BAGTXU.
8. Nitrogen transformation processes catalyzed by manure microbiomes in earthen pit and concrete storages on commercial dairy farms / B.H. Khairunisa U. Loganathan J.A. Ogejo B.Mukhopadhyay // *Environmental Microbiome*. - 2023. - № 18. P. 1-17.
9. Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting of dairy manure / H.K. Ahn, W. Mulbry, J.W. White, S.L. Kondrad // *Bioresource Technology*. - 2011. - № 102. P. 2904-2909.
10. Kreidenweis, U. Greenhouse gas emissions from broiler manure treatment options are lowest in well-managed biogas production / U. Kreidenweis, J. Breier, C. Herrmann // *Journal of Cleaner Production*. - 2021.- № 280. P. 1-13.
11. Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from Composting / L. Sarah, V. Chelsea, W. Thomas, D. Corinne // *Environmental Science & Technology*. - 2023.- № 57. – P. 2235–2247.
12. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives / D. Kondusamy, S. Vempall, V. Chitraichamy, P. Arivalagan // *Science of*

The Total Environment. - 2019. - № 695. - P. 1-13.

13 Meiwen, B. Greenhouse gas emission during swine manure aerobic composting: Insight from the dissolved organic matter associated microbial community succession / B. Meiwen, C, Hu, L. Yan, W. Lixia // Bioresource Technology. 2023.- № 373. – P. 1-8.

14. Инструмент для мониторинга экологического состояния и устойчивого развития сельскохозяйственного производства / А.Ю. Брюханов, Э.В. Васильев, Е.В. Шалавина, М.Ю. Охтилев, В.Н. Коромысличенко // Техника и технологии в животноводстве. - 2023. - № 1(49).- С. 78-84.

15. Определение оптимального состава субстрата на основе твердой фракции свиного навоза для твердофазной аэробной ферментации / Р.А. Уваров Е.В. Шалавина, Э.В. Васильев И.А. Фрейдкин // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. - 2019. - № 100. С. 187-196.

16. Variation in the mass and moisture content of solid organic waste originating from a pig complex during its fermentation / E. Shalavina, A. Briukhanov, E. Vasilev, R. Uvarov, A. Valge // Agronomy Research.- 2020. -Т. 18. - Special Issue 2. P. 1479-1486.

17. The behavior of acidity, total nitrogen and total phosphorus in solid organic waste from

the pig-rearing complex during its fermentation / A. Briukhanov, E. Shalavina, E. Vasilev, R. Uvarov, A. Valge // Engineering for Rural Development. 2020. - № 19. – P. 645-652.

18. Precision fermentation to advance fungal food fermentations / FC. Kong, R.N. Kuan, S. Malsha, N.C. Wei // Current Opinion in Food Science. - 2022. - № 47. P. 1-9.

19 Fomicheva, N.V. The effect of the ratio of peat and manure on the efficiency of the fermentation process // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. № 1076. P. 012042-012044.

20 Fomicheva, N.V. Technological line for processing animal waste / N.V. Fomicheva, G. Yu. Rabinovich // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - № 677. - P. 52004-52005.

21. A Design of a Solar Fermentation System on Chicken Manure by Fuzzy Logic Temperature Control / J-J. Su, H-C, Huang, Y-C. Chen, M-Y. Shih // Applied Sciences. 2021. № 11(22). P. 1-11.

22. Aguirre-Villegas, H.A. From waste to value: Energy, emissions and nutrients associated with manure processing pathways / H.A. Aguirre-Villegas, R. Larson D.J. Reinemann // Biofuels, Bioproducts and Biorefining. - 2014. - № 8. - P. 770-793.

## RESEARCH RESULTS OF BIOTHERMAL FERMENTATIVE PROCESSING OF ORGANIC WASTE FROM A PIG REARING COMPLEX WITH ASSESSMENT OF EMISSIONS GENERATED

*Vasilev E.V., Maksimov D.A., Shalavina E.V.*

*Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of Federal State Budget Scientific Institution “Federal Scientific Agroengineering Center VIM”, 196634 Saint Petersburg, Tiarlevo, Filtrovskoje Shosse, 3; Tel: +7 (812) 476-86-02 Email: nii@sznii.ru.*

**Keywords:** environmental safety, animal by-products, biofermentation, technology, emissions, climatically active substances.

*The progress in intensive livestock farming makes the problem of generated organic waste utilisation harder. The adopted Federal law № 248 of 14.07.2022 introduces the concept of animal by-products. They are animal/poultry manure, bedding, and manure-bearing wastewater, in case they are involved in the production process, including the soil fertility recovery. But they can be converted into the high quality organic fertilisers through aerobic fermentation in a short timeframe. The process takes place in closed installations protected against the effect of uncontrollable external factors. In the experimental study, an organic wastes mix coming from the pig-breeding complex was processed on the technological line with a drum fermenter. The mix included the solid fractions of manure: 60% – after the screw separator and 32 % – after the decanter centrifuge. The waste from mechanical grain cleaning was the rest 8%. The installation was set to the following operating mode: aeration regularity – 5 min/h; air consumption – 11.3 m<sup>3</sup>/h per 1.7 tons of fermented mix; drum rotation interval – 3 revolutions every 12 hours. The given mix composition and the processing mode contributed to the active and stable fermentation process. The temperature did not fall below 55°C. The most active organic matter decomposition took place from the second to the fifth day. During the whole process, the dry matter decomposition was 5%. The possible carbon dioxide emission was 60 kg/t. The nitrogen loss in the form of gas emission was about 0.6 kg/t of processed material.*

### *Bibliography:*

- 1. Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust / G.F. Huang, Q.T. Wu, J.W. Wong, B.B. Nagar // Bioresource Technology. 2006. No 97. P. 1834-1842.*
- 2. Effects of the C/N ratio on the microbial community and lignocellulose degradation, during branch waste composting / Y. Xie, L. Zhou, J. Dai, J. Chen, X. Yang, X. Wang, Z. Wang, L. Feng // Bioprocess and Biosystems Engineering.- 2022.- No 45.- P. 1163–1174.*
- 3. Relationship between bacterial diversity and environmental parameters during composting of different raw materials / X. Wang, H. Cui, J. Shi, X. Zhao, Y. Zhao, Z. Wei // Bioresource Technology. - 2015. - No 98.- P. 395-402.*
- 4. Assessment of humification degree of dissolved organic matter from different composts using fluorescence spectroscopy technology / Z. Wei, X. Zhao, C. Zhu, B. Xi, Y. Zhao, X. Yu // Chemosphere. - 2014. - № 95. – P. 261-267.*
- 5. Effect of Microbes in Enhancing the Composting Process: A Review / R. Deblina, K. Sunil, N. Suchandra, A. Osman // International Journal of Plant & Soil Science. - 2022. - No 23. - P. 630-641.*

6. Results of the practical use of fertilizers from chicken manure in the cultivation of winter wheat / F. S. Sibagatullin, Z. M. Khaliullina, A. M. Petrov, A. S. Ganiev // *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. – 2021. – Vol. 16. – No. 1(61). – P. 51-56. – DOI 10.12737/2073-0462-2021-51-56. – EDN PVOEGE.
7. Use of fertilizers from chicken manure for growing organic products / A. S. Ganiev, F. S. Sibagatullin, B. G. Ziganshin [et al.] // *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. – 2022. – Vol. 17. – No. 1(65). – P. 9-14. – DOI 10.12737/2073-0462-2022-9-14. – EDN BAGTXU.
8. Nitrogen transformation processes catalyzed by manure microbiomes in earthen pit and concrete storages on commercial dairy farms / B.H. Khairunisa, U. Loganathan, J.A. Ogejo, B. Mukhopadhyay // *Environmental Microbiome*. – 2023. – No 18. P. 1-17.
9. Pile mixing increases greenhouse gas emissions during composting of dairy manure / H.K. Ahn, W. Mulbry, J.W. White, S.L. Kondrad // *Bioresource Technology*. – 2011. – No 102. P. 2904-2909.
10. Emission of volatile organic compounds from broiler manure treatment options are lowest in well-managed biogas production / U. Kreidenweis, J. Breier, C. Herrmann // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – No 280. P. 1-13.
11. Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions from Composting / L. Sarah, V. Chelsea, W. Thomas, D. Corinne // *Environmental Science & Technology*. – 2023. – No 57. – P. 2235–2247.
12. Emission of volatile organic compounds from composting: A review on assessment, treatment and perspectives / D. Kondusamy, S. Vempall, V. Chitraichamy, P. Arivalagan // *Science of The Total Environment*. – 2019. – No 695. – P. 1-13.
13. Meiwien, B. Greenhouse gas emission during swine manure aerobic composting: Insight from the dissolved organic matter associated microbial community succession / B. Meiwien, C. Hu, L. Yan, W. Lixia // *Bioresource Technology*. – 2023. – No 373. – P. 1-8.
14. Tool for monitoring the environmental status and sustainable development of agricultural production / A.Yu. Briukhanov, E.V. Vasilev, E.V., Shalavina, M.Yu. Okhtilev, V.N. Koromyslichenko // *Equipment and Technologies in Animal Husbandry*. – 2023. – No. 1(49) – P. 78-84.
15. Optimisation of substrate based on solid fraction of pig manure for solid-phase aerobic fermentation / R.A. Uvarov, E.V. Shalavina, E.V. Vasiiev, I.A. Freidkin // *Technologies, machines and equipment for mechanized crop and livestock production*. – 2019. – No. 100. P. 187-196.
16. Variation in the mass and moisture content of solid organic waste originating from a pig complex during its fermentation / E. Shalavina, A. Briukhanov, E. Vasilev, R. Uvarov, A. Valge // *Agronomy Research*. – 2020. – Vol. 18. – Special Issue 2. P. 1479-1486.
17. The behavior of acidity, total nitrogen and total phosphorus in solid organic waste from the pig-rearing complex during its fermentation / A. Briukhanov, E. Shalavina, E. Vasilev, R. Uvarov, A. Valge // *Engineering for Rural Development*. 2020. – No. 19. – P. 645-652.
18. Precision fermentation to advance fungal food fermentations / F.C. Kong, R.N. Kuan, S. Malsha, N.C. Wei // *Current Opinion in Food Science*. – 2022. – No 47. P. 1-9.
19. Fomicheva, N.V. The effect of the ratio of peat and manure on the efficiency of the fermentation process // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. No 1076. P. 012042-012044.
20. Fomicheva, N.V. Technological line for processing animal waste / N.V. Fomicheva, G.Yu. Rabinovich // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – No. 677. – P. 52004-52005.
21. A Design of a Solar Fermentation System on Chicken Manure by Fuzzy Logic Temperature Control / J-J. Su, H-C, Huang, Y-C. Chen, M-Y. Shih // *Applied Sciences*. 2021. No. 11(22). P. 1-11.
22. Aguirre-Villegas, H.A. From waste to value: Energy, emissions and nutrients associated with manure processing pathways / H.A. Aguirre-Villegas, R. Larson D.J. Reinemann // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. – 2014. – No. 8. – P. 770-793.