



Анализ эффективности технологии разделения навоза на фракции с последующей ректификацией жидкой фракции

Е. В. Шалавина , Э. В. Васильев, Э. А. Папушин

Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиал федерального научного агроинженерного центра ВИМ (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

 shalavinaev@mail.ru

Аннотация

Введение. По применяемым интенсивным технологиям переработки свиного навоза в органическое удобрение недостаточно данных для точного расчета содержания питательных элементов в конечных продуктах и, соответственно, их доз внесения.

Цель статьи. Определить эффективность технологии переработки свиного навоза, в которую включена ректификация жидкой фракции, по количественным и качественным характеристикам навоза и конечных продуктов, а также проследить перераспределение общего азота между конечными продуктами на примере пилотного свиноводческого комплекса.

Материалы и методы. Для исследования выбран типовой свиноводческий комплекс, на котором внедрена технология переработки свиного навоза, включающая подкисление навоза, флокуляцию навоза, разделение навоза на фракции в декантерной центрифуге, ректификацию жидкой фракции, пассивное компостирование твердой фракции, длительное выдерживание жидкой фракции. Технология позволяет получать три вида конечных продуктов: твердое органическое удобрение, концентрированную жидкость (аммиачную воду) и жидкость для удобрительных поливов. Расчет количественных и качественных характеристик свиного навоза и полученных из него продуктов сделан на основании методических рекомендаций по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета РД – АПК 1.10.15.02-17. Для сопоставления результатов осуществлены экспериментальные исследования. Анализ проб проведен в аналитической лаборатории Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства в 2022 г. Пробы отбирались с трехкратной повторностью. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе MS Excel.

Результаты исследования. Рассчитаны количественные и качественные характеристики свиного навоза, его твердой и жидкой фракции, а также конечных продуктов. Расчетные значения сравнивались со значениями из протоколов лабораторных анализов. Различие между расчетными и фактическими значениями не превышает 10,2 %, что говорит о достоверности расчетов.

Обсуждение и заключение. Внедрение на свиноводческом комплексе новой технологии позволило снизить эмиссии в атмосферу на 10 % за счет сохранности азота, сократить эксплуатационные затраты на транспортировку органического удобрения на 47 % посредством концентрации питательных веществ в меньшем объеме и повысить плодородие почв с помощью удобрительных поливов.

© Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Папушин Э. А., 2023



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: свиноводческий комплекс, технология, навоз, флокуляция, ректификация, общий азот, органические удобрения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности: авторы выражают благодарность рецензентам за указанные замечания, которые позволили повысить качество статьи.

Для цитирования: Шалавина Е. В., Васильев Э. В., Папушин Э. А. Анализ эффективности технологии разделения навоза на фракции с последующей ректификацией жидкой фракции // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 2. С. 237–255. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.237-255>

Original article

Analysis of Manure Separation Technology Efficiency into Fractions Followed by Liquid Fraction Rectification

E. V. Shalavina , E. V. Vasilev, E. A. Papushin

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

 shalavinaev@mail.ru

Abstract

Introduction. There is not enough data on the used intensive technologies of processing pig manure into organic fertilizer to accurately calculate the content of nutrients in the final products and, accordingly, their doses of application.

Aim of the Article. To determine the efficiency of pig manure processing technology, which includes liquid fraction rectification, by the quantitative and qualitative characteristics of manure and final products, and to trace the redistributing total nitrogen between the final products on the example of a pilot pig breeding complex production.

Materials and Methods. For the study, there was chosen a typical pig-breeding complex, where the pig manure processing included slurry acidification, flocculation, separation into fractions in a decanter centrifuge, rectification of liquid fraction, passive composting of solid fraction, and long-term storing of liquid fraction. The technology allows producing three types of end products: solid organic fertilizer, concentrated liquid (ammonia water), and fertilizer solution. Quantity and quality of pig manure and the end products were calculated by the known methods. Experimental studies were performed to compare the results. Samples were analyzed in the analytical laboratory of Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production in 2022. Three replications were carried out for each sample. The experimental data were statistically analysed in MS Excel.

Results. Quantitative and qualitative characteristics of pig manure, its solid and liquid fractions, and end products were calculated. The difference between the calculated and actual values does not exceed 10.2% that indicates the reliability of calculations.

Discussion and Conclusion. The introduction of a new technology at the pig-breeding complex has reduced atmospheric emissions by 10% due to the nitrogen conservation, has reduced operating costs for transporting organic fertilizer by 47% due to the concentration of nutrients in a smaller volume and has improved soil fertility through fertilizer irrigation.

Keywords: pig complex, technology, manure, flocculation, rectification, total nitrogen, organic fertilizers

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements: The authors would like to thank the reviewers for their help in improving the manuscript.

For citation: Shalavina E.V., Vasilev E.V., Papushin E.A. Analysis of Manure Separation Technology Efficiency into Fractions Followed by Liquid Fraction Rectification. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(2):237–255. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202302.237-255>

Введение

Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденная Президентом России, «устанавливает принципы, приоритеты, основные направления и меры реализации государственной политики в этой области»¹ на ближайшую и долгосрочную перспективу. В ней сформулированы большие вызовы для общества, государства и науки, в числе которых «потребность в обеспечении продовольственной безопасности и продовольственной независимости России, конкурентоспособности отечественной продукции на мировых рынках продовольствия, снижение технологических рисков в агропромышленном комплексе»², а также поддержание экологической безопасности. Для реализации Стратегии формируется соответствующее законодательство, внесены поправки в нормативные акты³, регулирующие переход на наилучшие доступные технологии, приняты соответствующие законы⁴.

Ставится задача перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, а также высокопродуктивному и экологически

чистому агропроизводству. Данную задачу в рамках фундаментальных и поисковых научных исследований по механизации, электрификации и автоматизации сельскохозяйственного производства необходимо решать, в том числе путем разработки экологически безопасных машинных технологий.

В настоящее время сохраняется тенденция к увеличению производственной мощности животноводческих предприятий, особенно свиноводческих комплексов, на которых образуются значительные объемы жидкого навоза. Свиноводство оказывает существенное воздействие на агроэкосистему и выдвигает ряд серьезных угроз, которые не ограничиваются только территорией фермы, а непосредственно связаны с прилегающими зонами и косвенным образом влияют на экологическое состояние региона в целом.

Свиноводческие комплексы применяют разные интенсивные технологии переработки свиного навоза в органическое удобрение, позволяющие концентрировать питательные вещества в малом объеме. Транспортировка концентрированных органических удобрений становится

¹ Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации : утв. Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420384257?marker=6580IP> (дата обращения: 28.02.2023).

² Там же.

³ Об охране окружающей среды : федер. закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ : принят Государственной Думой 20 декабря 2001 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901808297> (дата обращения: 28.02.2023).

⁴ О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : федер. закон от 14 июля 2022 г. № 248-ФЗ : принят Государственной Думой 28 июня 2022 г. URL: <https://rg.ru/documents/2022/07/19/document-apk.html> (дата обращения: 28.02.2023); Об ограничении выбросов парниковых газов : федер. закон от 2 июля 2021 г. № 296-ФЗ : принят Государственной Думой 1 июня 2021 г. URL: <https://rg.ru/documents/2021/07/07/fz-ob-ograni4enii-vybrosov-parnikovyh-gazov-dok.html> (дата обращения: 28.02.2023).

более рентабельной. Однако здесь необходим точный учет их потока, в частности, азота из навоза в конечный продукт – жидкое органическое удобрение [1–3].

Свиной навоз характеризуется низким содержанием сухого вещества – не более 8–10 %. Поэтому одной из основных технологий его первичной переработки является разделение на жидкую и твердую фракции [4–6]. Наиболее распространено длительное выдерживание жидкой фракции в герметичных хранилищах. Существуют более эффективные и экологически безопасные технологии ее обработки, в частности ректификацией.

По применяемым интенсивным технологиям переработки свиного навоза в органическое удобрение недостаточно данных для точного расчета содержания питательных элементов в конечных продуктах и, соответственно, их доз внесения. Поэтому при таких расчетах применяются усредненные значения содержания питательных веществ⁵. Для получения достоверных численных значений были проведены исследования технологии переработки свиного навоза, включающие подкисление навоза, флокуляцию и его разделение на фракции с помощью декантерной центрифуги, ректификацию жидкой фракции, пассивное компостирование твердой фракции, длительное выдерживание жидкой фракции.

Цель исследования – провести оценку эффективности технологии разделения свиного навоза на фракции с последующей переработкой жидкой фракции методом ректификации. Такие исследования необходимы для объективного учета движения общего азота из свиного навоза в конечные продукты – твердое органическое удобрение, жидкое

концентрированное органическое удобрение и жидкость для удобрительных поливов. Эффективность изучаемой технологии оценивалась по показателю «сохранность азота» – количество азота в одной тонне готового органического удобрения относительно количества азота в исходном навозе.

Обзор литературы

Доступно много различных технологий переработки навоза, от простых и надежных решений в масштабах фермы до технологически продвинутых решений с более сложными цепочками переработки [7; 8]. Одни технологии отработаны и готовы к внедрению, другие – все еще находятся в процессе разработки.

Переработка навоза предполагает использование различных методов и приемов, позволяющих каким-либо образом изменить его количественные и качественные характеристики с целью уменьшения объемов навоза и возможности получения различных конечных продуктов. Это могут быть биологические, химические, физические методы переработки или их комбинации [9–11]. Технологии могут использоваться индивидуально или последовательно одна за другой, создавая различные технологические цепочки. В результате получают различные органические удобрения, оказывающие влияние на почву [12–15].

Ученые из КНР исследовали влияние известковой добавки на изменения органических веществ, удаление антибиотиков и видообразование тяжелых металлов при пассивном компостировании свиного навоза [16]. В результате добавление извести увеличивало пиковую температуру и продлевало термофильный период. Известь улучшила переход органических веществ и ускорила процесс

⁵ Разработка регламентов по обращению с навозом в рамках проекта «ЛУГА-БАЛТ» / А. Ю. Брюханов [и др.] // Экологически безопасное развитие сельских территорий и сохранение водных объектов : сб. науч. трудов междунар. семинаров, проведенных в рамках Российско-Финляндского проекта «Чистые реки – в здоровое Балтийское море» SE 717 в 2013–2015 гг. ; под общ. ред. В. Б. Минина. СПб. : ИАЭП, 2016. С. 60–66.

компостирования. Хлортетрациклин быстрее растворялся с добавлением извести, по сравнению с контролем.

Во Фландрии существует проблема нехватки земельных угодий для внесения всего органического удобрения, получаемого со свиноводческих комплексов. Поэтому основной задачей при обосновании технологии переработки свиного навоза было понижение содержания питательных веществ (азота и фосфора) в органическом удобрении, вносимом на собственные земельные угодья с концентрацией питательных веществ в органическом удобрении, транспортируемом в другие регионы [17]. В соответствии с обоснованной технологией жидкий свиной навоз изначально разделялся на фракции. Жидкая фракция подавалась на блок биологической очистки в соответствии с полупериодическим процессом нитрификации-денитрификации, после которого направлялась на блок испарения и конденсации. Очищенная жидкость использовалась на земельных угодьях сельскохозяйственного назначения, концентрированное органическое удобрение транспортировалось в соседние регионы, где в нем была потребность.

В Нидерландах свиной навоз также перерабатывали в фосфорное удобрение для экспорта в соседние регионы [18]. При переработке применяли метод подкисления. В Дании проведены исследования по добавлению различных типов флокулянтов в навоз перед разделением его на фракции [19]. Их целью являлось максимальное выделение фосфора из навоза. Было установлено, что при оптимальной флокуляции удаляется 95 % фосфора.

Актуальность имеют технологические линии по переработке навоза с помощью микробной обработки [20]. Контролируемые режимы и параметры процесса брожения формируют качественный, экологически чистый, готовый к использованию продукт. Также возможно получение из навоза жидкофазного биопрепарата

с высоким уровнем биогенности – общее микробное число не менее 1×10^{10} КОЕ/мл.

Ученые из Испании, Финляндии, Колумбии, Китая, Италии и других стран занимаются решением проблемы уменьшения эмиссий при переработке навоза. Так, в Италии проведены исследования выбросов аммиака в процессе переработки навоза в реакторе в зависимости от продолжительности переработки [21]. В результате обнаружено, что увеличение времени переработки приводит к росту эмиссий и повышению капитальных и эксплуатационных затрат. Также проанализированы технологические решения по очистке воздуха при переработке жидкого навоза (скрубберы, биофльтрация, биоскрубберы) и доказано, что наиболее используемой технологией является биофльтрация воздуха [22].

В Финляндии были изучены возможности модернизации технологий переработки навоза с целью повышения транспортабельности органического удобрения [23]. Для этого необходимы технологические решения, уменьшающие массу навоза и позволяющие повысить концентрацию питательных веществ. В результате получено концентрированное органическое удобрение, которое транспортировалось на дальние расстояния. В свою очередь, в Колумбии проведены исследования по эмиссиям питательных веществ для четырех технологий переработки жидкого навоза, в том числе разделения его на твердую и жидкую фракции, метановое сбраживание и длительное выдерживание [24]. Результаты показали, что при внедрении любой из этих технологий выбросы меньше, чем при базовой технологии – пассивном компостировании.

Китайские исследователи при изучении технологии разделения жидкого навоза на фракции с последующим компостированием твердой фракции и анаэробной переработкой жидкой фракции обосновали новую конструкцию биогазовой

установки [25]. Бразильские ученые с помощью эксперимента по переработке жидкой фракции навоза в аэробных прудах определили, что для получения чистого продукта (жидкого органического удобрения), пригодного для внесения на земельные угодья, достаточно 46 дней [26].

В Нидерландах жидкий навоз разделяли на фракции, применяя мембраны с последующим анаэробным сбраживанием жидкой фракции и сжиганием твердой фракции, и получали полезные продукты: биогаз от анаэробного сбраживания для производства энергии, электричество от сжигания твердой фракции с использованием нагретого пара в турбине и жидкое органическое удобрение [27].

Во Франции были проведены исследования по используемости различных технологий переработки навоза (с 2008 по 2016 г.) [28]. Наиболее распространенными технологиями переработки являются пассивное компостирование (61,7 %), аэробная (21,0 %) и анаэробная (7,3 %) переработки. Исследователями предложено создание платформ для коллективной переработки навоза различными технологиями в сочетании с процессом извлечения азота для производства органических добавок и удобрений в удобной для продажи и транспортировки форме.

В Италии рассматривали применение переработанного навоза в качестве биопрепарата с целью поддержания и повышения плодородия почвы [29]. Ферментативный анализ показал его биоактивный потенциал в контексте круговорота питательных веществ и поддержания плодородия.

В 2020 г. исследования в Польше были направлены на изучение влияния различных типов удобрений, полученных в результате переработки навоза – твердое органическое удобрение после компостирования, зола от сжигания, эффлюент после метанового сбраживания, материал после пиролиза, на почву, минерализацию и оптимальное соотношение

C:N:P для минимизации потерь питательных веществ [30]. В результате установлено, что оптимальное соотношение для нормализации процессов в почве должно быть 100-10-1. Для этого необходимо смешивать навоз перед переработкой с дополнительными компонентами, содержащими углерод. Однако даже при оптимальном применении удобрений их использование на одних и тех же полях может продолжаться не более двух лет подряд. Рекомендовано вносить органическое удобрение на основе навоза на одни и те же почвы 1 раз в 4 года.

В США в 2020 г. обобщили результаты многолетних исследований о влиянии различных видов переработанного навоза и помета на плодородие почв, физические свойства почвы (объемную плотность, инфильтрацию, водоудерживающую способность), биологию почвы и урожайность различных зерновых культур в различных системах земледелия [31]. Было подтверждено, что влияние органического удобрения на почву зависит от физических и химических свойств самого навоза и помета, применяемых технологических и управленческих решений по переработке навоза и помета в органическое удобрение, состояния окружающей среды, включая норму и время внесения, тип почвы и климат. В результате выявлено, что правильное применение органических удобрений способствует созданию устойчивой экосистемы, обеспечивающей такое понятие, как «здоровая почва».

Предметом исследований в Испании в 2021 г. было влияние вносимого органического удобрения на биоразнообразие почвы [32]. Сделан вывод, что для биоразнообразия почвы качественные характеристики органического удобрения намного важнее количественных.

Таким образом, в результате проведенного анализа установлено, что значительная часть исследований нацелена на увеличение концентрации питательных

веществ в меньших объемах органических удобрений для сокращения транспортных издержек. Ученые в разных странах подтвердили, что в зависимости от технологий переработки навоза получаются органические удобрения с различными регенеративными свойствами и химическим составом, воздействующие на сообщества почвенных бактерий и грибов, создание стабильной почвенной среды, улучшение питательного статуса почвы.

Материалы и методы

Для исследования выбран типовой свиноводческий комплекс, на котором изначально использовалась технология переработки свиного навоза в органическое удобрение методом длительного выдерживания в герметичных лагунах с мембранным покрытием – «Технология до модернизации». Ее применение приводило к следующим негативным последствиям: заиливанию лагун и нехватке земельных угодий сельскохозяйственного назначения в рентабельном радиусе транспортировки. Решением первой проблемы было более частое перемешивание навоза, приводящее к увеличению эмиссий в атмосферный воздух. Вторая проблема приводила к затратам на транспортировку жидкого органического удобрения к месту внесения до 200 руб. на 1 т жидкого органического удобрения.

Чтобы избежать этих последствий в свиноводческом комплексе, заменили существующую технологию на технологию переработки свиного навоза: подкисление, флокуляция и разделение навоза на фракции в декантерной центрифуге, ректификация жидкой фракции, пассивное компостирование твердой фракции, длительное выдерживание жидкой фракции.

Технология позволяет получать три вида конечных продуктов: твердое органическое удобрение (ТОУ), полученное методом пассивного компостирования; концентрированную жидкость (аммиачную воду), полученную методом

ректификации; жидкость для удобри-тельных поливов, полученную путем длительного выдерживания.

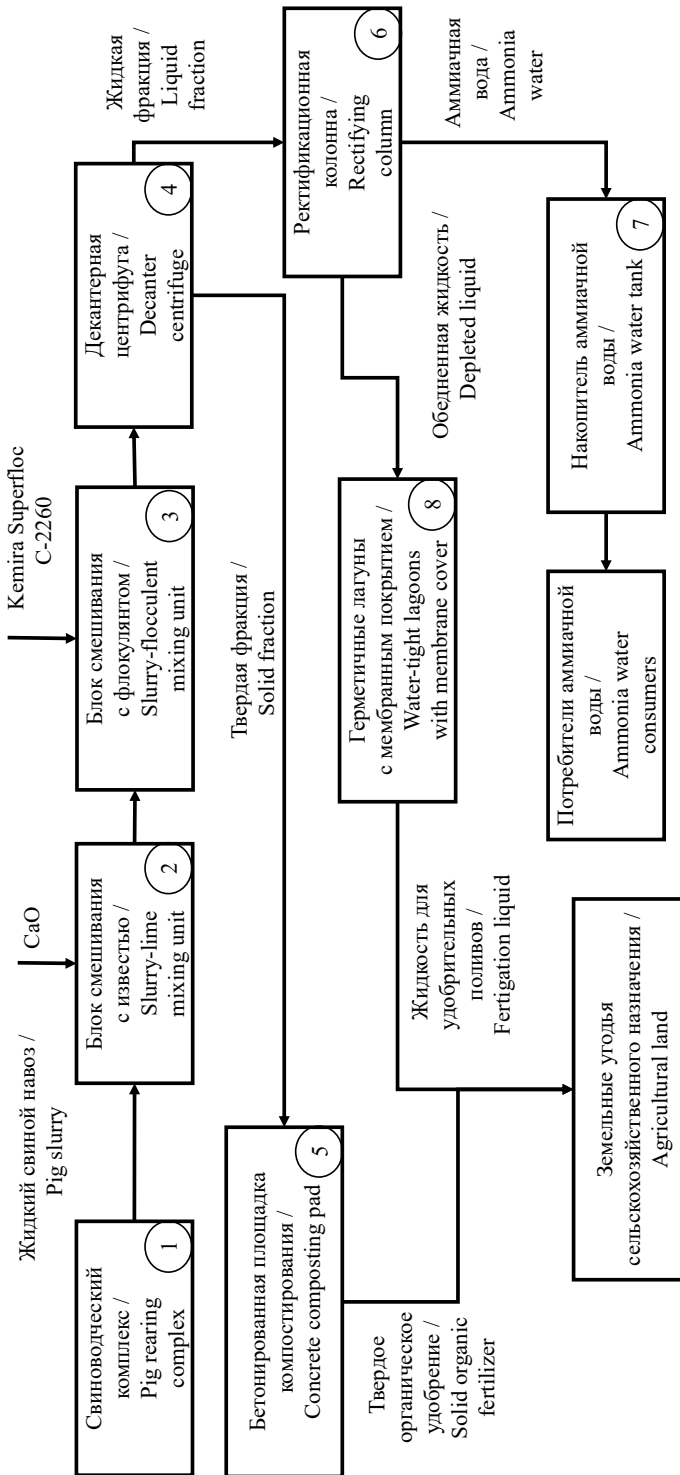
Блок-схема «Технологии после модернизации» переработки свиного навоза в конечные продукты представлена на рисунке 1.

В соответствии с рисунком 1, после навозоприемника, расположенного на свиноводческом комплексе (Блок 1), жидкий навоз насосом по трубопроводу перекачивается в предварительный бак объемом 4 м³ (Блок 2), в котором происходит смешивание жидкого навоза с негашеной известью (СаО) при помощи погружного миксера-гомогенизатора.

Во время смешивания негашеной извести с жидким навозом начинается реакция гашения извести, сопровождаемая обильным выделением тепла. Негашеная известь дозируется из буферной емкости.

Дозировка негашеной извести СаО производится автоматически, ее объемная доля определяется оператором на основании проведенных экспресс анализов рН жидкого навоза. Дозировка негашеной извести необходима для того, чтобы жидкий навоз стал высокощелочной средой. Растворенный в жидком навозе аммонийный азот в нормальной среде (рН < 10) представлен как соединение NH₄ и является нелетучим соединением, а в среде высоко-щелочной (рН > 10) переходит в состояние NH₃ – это соединение более летучее и имеет более низкую температуру кипения, поэтому его можно выделить в ректификационной установке (колонне).

Предварительно смешанный жидкий навоз и негашеная известь с помощью измельчающего насоса загружаются в блок смешивания с флокулянт (Блок 3), в котором осуществляется подмешивание полиэлектролита (флокулянт – Kemira Superfloc C-496 – катионный полиакриламид), выбранного в соответствии с типом и характеристиками свиного навоза с целью оптимизации процесса разделения навоза на фракции.



Р и с. 1. Блок-схема исследуемой технологии
 Fig. 1. Block diagram of the technology under investigation

Жидкий навоз в смеси с негашеной известью и флокулянтами насосами перекачивается в декантерную центрифугу (Блок 4). Попадая в декантерную центрифугу, жидкий навоз под действием центробежных сил осветляется, твердые частицы выпадают в осадок. Твердая фракция жидкого навоза перемещается с помощью винтовых конвейеров в мобильный транспорт и транспортируется на бетонированную площадку компостирования (Блок 5). Твердое органическое удобрение, полученное методом пассивного компостирования, вносится на земельные угодья сельскохозяйственного назначения соседних растениеводческих предприятий.

Жидкая фракция свиного навоза после декантерной центрифуги через один из теплообменных аппаратов «вода – вода» подается в верхнюю часть нижней камеры ректификационной колонны (Блок 6). В противоположном направлении через теплообменные аппараты с помощью центробежного насоса из нижней части ректификационной установки прокачивается уже обедненная жидкая фракция свиного навоза, которая охлаждается, проходя через теплообменник, отдавая избыточную теплоту поступающей жидкой фракции свиного навоза после декантерной центрифуги.

Протекая через массообменные элементы ректификационной колонны, жидкая фракция свиного навоза нагревается. В процессе нагрева аммонийный азот, растворенный в жидкой фракции свиного навоза, имея более низкую температуру кипения, начинает испаряться. Жидкая фракция свиного навоза, из которой испарился аммонийный азот, используется для нагрева исходной жидкой фракции свиного навоза, поступающей с декантерной центрифуги через теплообменник.

Пары аммонийного азота конденсируются в теплообменном аппарате. Для процесса конденсации используется

химически подготовленная пресная вода, находящаяся в отдельном баке. В результате образуется жидкое концентрированное органическое удобрение (аммиачная вода), которое откачивается в герметичный накопитель (Блок 7). Жидкое концентрированное органическое удобрение (ЖКОУ) передается другим юридическим лицам.

Обедненная жидкая фракция свиного навоза после ректификационной колонны насосом перекачивается в герметичные лагуны с пленочным покрытием (Блок 8). Полученное жидкое органическое удобрение (ЖОУ) используется для удобрительных поливов.

В рамках исследований рассчитаны количественные и качественные характеристики свиного навоза, его твердой и жидкой фракции, ЖКОУ и ЖОУ.

Расчет количественных и качественных характеристик свиного навоза осуществлялся методом баланса массы⁶. Фактическая масса навоза определялась с помощью приборов учета, установленных в навозоприемнике на свиноводческом комплексе. Фактические качественные характеристики навоза (влажность, общий азот) определялись экспериментальным путем. Отбирались пробы жидкого навоза из навозоприемника, расположенного на свиноводческом комплексе. В пробе определялась влажность материала в соответствии с ГОСТ 26713-85 «Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка» и общий азот в соответствии с ГОСТ 26715-85 «Удобрения органические. Методы определения общего азота». Полученные расчетные и фактические данные сопоставлялись для подтверждения корректности расчета.

Расчет количественных и качественных характеристик твердой и жидкой фракции свиного навоза осуществлялся по ранее разработанной методике [33]. Фактические качественные характеристики твердой и жидкой фракций навоза

⁶ Overview of Calculation Methods for the Quantity and Composition of Livestock Manure in the Baltic Sea region / A. Kaasik [et al.]. 2019. URL: https://www.luke.fi/manurestandards/wp-content/uploads/sites/25/2019/06/WP3-report_ManureStandards_Final2.pdf (дата обращения: 28.02.2023).

(влажность, общий азот) определялись экспериментальным путем. Отбирались пробы твердой и жидкой фракций навоза после декантерной центрифуги. В пробах определялась влажность материала и общий азот. Полученные расчетные и фактические данные сопоставлялись для подтверждения корректности расчета.

Расчет количественных и качественных характеристик аммиачной воды и обедненной жидкости осуществлялся в соответствии с источниками⁷ [34; 35]. Фактические качественные характеристики аммиачной воды и обедненной жидкости (влажность, общий азот) определялись экспериментальным путем. Отбирались пробы аммиачной воды и обедненной жидкости после ректификационной колонны. В пробах определялась влажность материала и общий азот. Полученные расчетные и фактические данные сопоставлялись для подтверждения корректности расчета.

Экспериментальные исследования были проведены на пилотном свиноводческом комплексе; анализы проб выполнены в аналитической лаборатории ИАЭП – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в 2022 г. Пробы отбирались с трехкратной повторностью. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе Excel.

Результаты исследования

Выборный для исследований свиноводческий комплекс рассчитан на содержание 6 700 свиноматок и производство 180 тыс. откормочных свиней в год (рис. 2).

Содержание животных – бесподстилочное на частично щелевых полах. Навоз самотеком поступает в навозоприемник, расположенный на свиноводческом комплексе. Площадки для переработки свиного навоза в органическое удобрение представлены на рисунке 3.



Р и с. 2. Внешний вид свиноводческого комплекса
F i g. 2. View of the pig breeding complex



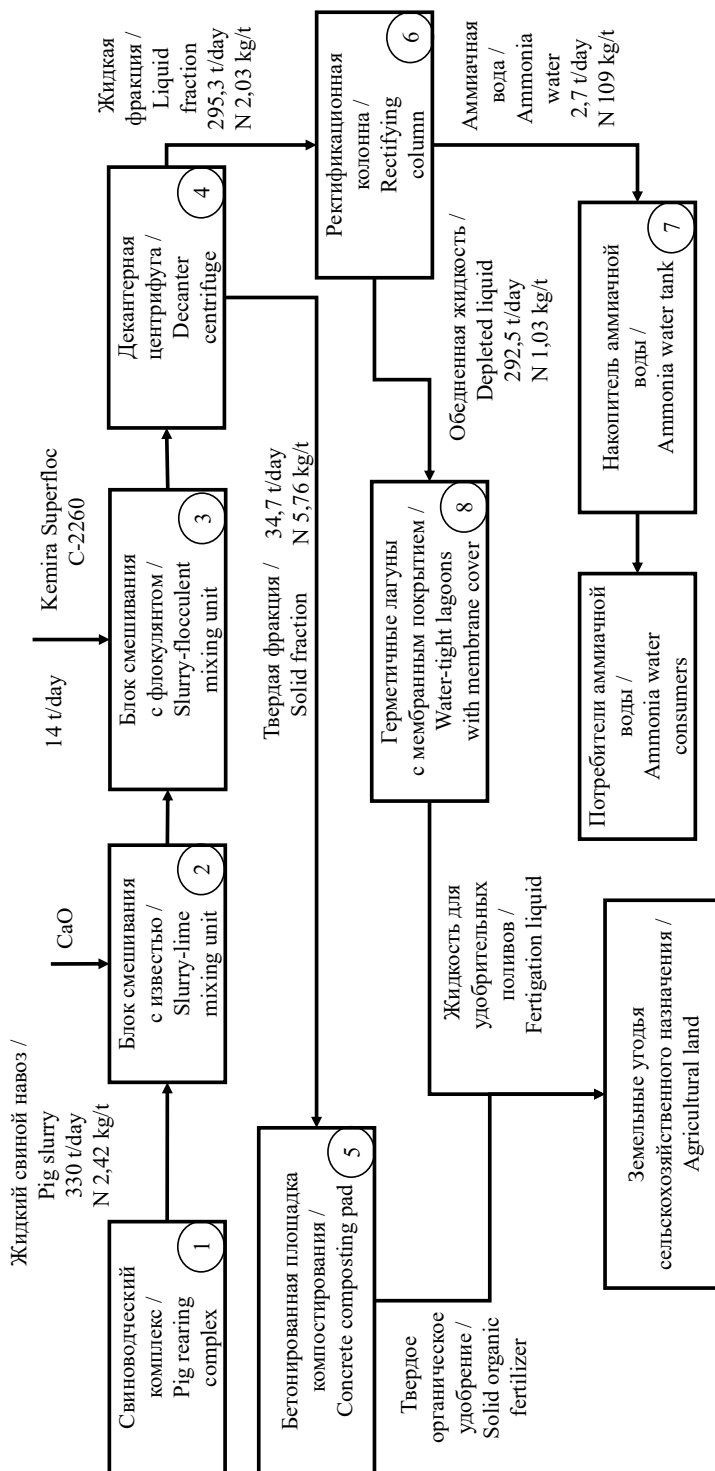
Р и с. 3. Площадка для переработки свиного навоза в органическое удобрение – герметичные лагуны с мембранным покрытием для обедненной фракции после ректификации
F i g. 3. Facilities for processing pig manure into organic fertilizers – water-tight lagoons with membrane cover for the depleted liquid fraction after rectification

Количественные и качественные характеристики свиного навоза, его твердой и жидкой фракции, а также конечных продуктов представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, различие между расчетными и фактическими значениями не превышает 10,2 %, что говорит о достоверности расчетов.

Балансовая схема потоков массы компонентов и массы общего азота в компонентах представлена на рисунке 4.

⁷ Лаптев А. Г., Коначин А. М., Минеев Н. Г. Теоретические основы и расчет аппаратов разделения гомогенных смесей : учеб. пособие. Казань : Казанский гос. энерг. ун-т, 2007. 426 с. URL: https://ingehim.ru/images/Laptev_Konakhin_Mineev_2007_Theoretical_fundamentals_and_calculation_of_apparatuses_of_separation_of_homogeneous_mixtures.pdf (дата обращения: 28.02.2023).



Р и с. 4. Балансовая схема потоков массы компонентов и массы общего азота в компонентах свиного навоза
 F i g. 4. Balance diagram of component mass flows and of total nitrogen mass in pig manure components

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

**Количественные и качественные характеристики свиного навоза
и полученных из него продуктов**
Quantity and quality of pig manure and the end-products

Показатель / Indicator	Расчетные значения / Calculated values	Фактические значения / Actual values	Различие / Difference, %
Масса навоза, т/сут / Mass of manure, t/day	302	330	8,48
Влажность навоза, % / Moisture content of manure, %	96,9	98,2	1,3
Масса общего азота в навозе, т/сут / Mass of total nitrogen, t/day	0,76	0,79	3,8
Масса твердой фракции навоза, т/сут / Mass of solid fraction, t/day	36,8	34,7	6,1
Влажность твердой фракции навоза, % / Moisture content of solid fraction, %	73,4	71,2	3,1
Масса общего азота в твердой фракции навоза, т/сут / Mass of total nitrogen in solid fraction, t/day	0,21	0,20	5
Масса жидкой фракции навоза, т/сут / Mass of liquid fraction, t/day	265,2	295,3	10,2
Влажность жидкой фракции навоза, % / Moisture content of liquid fraction, %	98,6	99,1	0,5
Масса общего азота в жидкой фракции навоза, т/сут / Mass of total nitrogen in liquid fraction, t/day	0,55	0,59	6,8
Масса обедненной жидкости, т/сут / Mass of depleted liquid, t/day	284,4	292,5	2,8
Влажность обедненной жидкости, % / Moisture content of depleted liquid, %	99,8	99,4	0,4
Масса общего азота в обедненной жидкости, т/сут / Mass of total nitrogen in depleted liquid, t/day	0,28	0,3	7,1
Масса аммиачной воды, т/сут / Mass of ammonia water, t/day	2,6	2,7	5,1
Влажность аммиачной воды, % / Moisture of ammonia water, %	99,5	99,9	0,4
Масса общего азота в аммиачной воде, т/сут / Mass of total nitrogen in ammonia water, t/day	0,27	0,29	6,9

Обработка результатов экспериментальных исследований представлена в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, средние значения попадают в интервалы среднеквадратичных отклонений, следовательно, данные достоверны, сомнительные точки отсутствуют.

В результате переработки свиного навоза на свиноводческом комплексе образуются конечные продукты, готовые к использованию. Все конечные продукты соответствуют ГОСТ Р 53117-2008

«Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия»:

– твердое органическое удобрение, полученное методом пассивного компостирования твердой фракции свиного навоза после декантерной центрифуги. За год образуется 10 150 т ТОУ с содержанием азота 54,7 т (5,4 кг азота на 1 т ТОУ). Доза внесения ТОУ под зерновые культуры составляет 33,4 т/га. Оно вносится на земельные угодья сельскохозяйственного назначения;

Обработка результатов экспериментальных исследований
Experimental results analysis

Показатель содержания общего азота / Indicator of nitrogen content	1-я повторность / 1 st replication	2-я повторность / 2 nd replication	3-я повторность / 3 rd replication	Среднее значение / Average	Верхняя граница средних квадратичных отклонений / Upper limit of standard deviations $\bar{x} + \sigma$	Нижняя граница средних квадратичных отклонений / Lower limit of standard deviations $\bar{x} - \sigma$
в свином навозе, кг/т / in pig manure, kg/t	2,44	2,40	2,43	2,42	2,44	2,40
в твердой фракции свиного навоза, кг/т / in the solid fraction of pig manure, kg/t	5,78	5,77	5,74	5,76	5,78	5,74
в жидкой фракции свиного навоза, кг/т / in the liquid fraction of pig manure, kg/t	2,04	2,04	2,02	2,03	2,04	2,02
в обедненной жидкости, кг/т / in the depleted liquid, kg/t	1,02	1,03	1,04	1,03	1,04	1,02
в аммиачной воде, кг/т / in the ammonia water, kg/t	108,00	110,00	109,00	109,00	109,82	108,18

Примечания: \bar{x} – среднее значение; σ – среднеквадратичное отклонение.

Notes: \bar{x} – the mean value; σ – the root from variance.

– жидкое концентрированное органическое удобрение (аммиачная вода), полученное методом ректификации. За год образуется 1 000 т ЖКОУ с содержанием азота 107,9 т (107,9 кг азота на 1 т ЖКОУ). Доза внесения ЖКОУ под зерновые культуры составляет 1,7 т/га. ЖКОУ передается другим юридическим лицам;

– жидкость для удобрительных поливов, полученная методом длительного выдерживания. За год образуется 105 700 т удобрительной жидкости с содержанием азота 98,9 т (0,93 кг на 1 т (0,93 г/дм³). В соответствии с пунктом 6.10.10 СП 100.13330 «Мелиоративные системы и сооружения» концентрация общего азота в поливной воде при использовании стоков должна устанавливаться в зависимости от климатических

условий и состава возделываемых культур и не должна превышать 1,5 г/дм³ – для многолетних злаковых трав второго и последующих лет произрастания; 1,0 г/дм³ – для многолетних злаковых трав спустя два месяца после всходов, а также для люцерны, клевера, смеси однолетних трав без бобовых компонентов. На свиноводческом комплексе жидкость для удобрительных поливов используется на собственных земельных участках. В соответствии с ГОСТ Р 53117-2008 «Удобрения органические на основе отходов животноводства. Технические условия», поступление общего азота с удобрением не должно превышать 320 кг/га в год.

Обсуждение и заключение

В исследовании были рассмотрены преимущества и недостатки технологий до и после модернизации.

Были рассчитаны количественные и качественные характеристики свиного навоза и полученных из него конечных продуктов. Различие между расчетными и фактическими значениями не превышает 10,2 %, что говорит о достоверности расчетов.

Применение расчетного метода позволяет определить эффективность использования питательных веществ в органическом удобрении, полученном на основе свиного навоза.

Внедрение на свиноводческом комплексе технологического решения по разделению навоза на фракции с последующей ректификацией жидкой фракции (Технология после модернизации) дало следующие положительные результаты:

1. Исключение крупных твердых частиц из навоза, поступающего в навозохранилище, позволяет избежать заиливания лагун.

2. Получаемое ТОУ используется на земельных угодьях сельскохозяйственного назначения для повышения плодородия почв с учетом возделываемых культур.

3. Концентрация питательных веществ в ЖКОУ позволяет уменьшить массу транспортируемого органического удобрения, что приводит к снижению транспортных затрат при передаче ЖКОУ другим юридическим лицам. При этом качество удобрения не ухудшается.

4. Полученное концентрированное органическое удобрение передается другим юридическим лицам для повышения плодородия почв и получения запланированного урожая. Доза внесения рассчитана на примере озимого рапса и составляет 1,3 т/га.

5. Полученная жидкость для удобрительных поливов вносится на близлежащие собственные земельные угодья с использованием шланговой системы, тем самым снижаются эксплуатационные затраты.

6. Внедрение на предприятии Технологии после модернизации позволило в целом сократить капитальные затраты в 1,2 раза, а удельные эксплуатационные – в 5,6 раз.

Внедрение на свиноводческом комплексе технологических решений согласно Технологии после модернизации, которая включала подкисление навоза, флокуляцию, разделение навоза на фракции в декантерной центрифуге, компостирование твердой фракции и ректификацию жидкой фракции, позволило снизить эмиссии в атмосферу на 10 % за счет сохранности азота, сократить эксплуатационные затраты на транспортировку органического удобрения на 47 % за счет концентрации питательных веществ в меньшем объеме и повысить плодородие почв за счет удобрительных поливов.

Согласно закону «О побочных продуктах животноводства и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», свиной навоз является побочным продуктом животноводства, если соблюдаются «Требования к обращению побочных продуктов животноводства», утвержденные Постановлением правительства РФ от 31.10.2022 № 1940. Функционирование Технологии после модернизации не противоречит Постановлению правительства РФ от 31.10.2022 г. № 1940 и позволяет вести более точный учет объемов образования и использования переработанных побочных продуктов животноводства, что необходимо при заполнении Формы уведомления по побочным продуктам животноводства, утвержденной Приказом Министерства сельского хозяйства РФ от 07.10.2022 г. № 671 «Об утверждении порядка, сроков и формы направления уведомления об отнесении веществ, образуемых при содержании сельскохозяйственных животных, к побочным продуктам животноводства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трифанов А. В., Калюга В. В., Базыкин В. И. Состояние и тенденции развития производства свинины в Российской Федерации // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 90. С. 5–14. EDN: XELLCX
2. Васильев Э. В., Шалавина Е. В. Изменение содержания азота и фосфора в жидкой фракции свиного навоза при биологической очистке // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. № 85. С. 146–150. EDN: SYDQQR
3. Welfare Health and Productivity in Commercial Pig Herds / P. Racewicz [et al.] // *Animals*. 2021. Vol. 11, issue 4. Article no. 1176. <https://doi.org/10.3390/ani11041176>
4. Kariyama I. D., Zhai X., Wu B. Physical and Rheological Properties of Animal Manure: A Review // *Transactions of the ASABE*. 2018. Vol. 61, no. 3. P. 1113–1120. <https://doi.org/10.13031/trans.12768>
5. Pilot-Scale Demonstration of Membrane-Based Nitrogen Recovery from Swine Manure / B. Molinuevo-Salces [et al.] // *Membranes*. 2020. Vol. 10, no. 10. Article 270. <https://doi.org/10.3390/membranes10100270>
6. Environmental Impacts of Combining Pig Slurry Acidification and Separation under Different Regulatory Regimes – A Life Cycle Assessment / M. ten Hoeve [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2016. Vol. 181. P. 710–720. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.028>
7. Precision Fermentation to Advance Fungal Food Fermentations / K. F. Chai [et al.] // *Current Opinion in Food Science*. 2022. Vol. 47. Article no. 100881. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>
8. 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. Vol. 1076. Article no. 012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012042>
9. Mixed Acid Fermentation of Carbohydrate-Rich Dairy Manure Hydrolysate / A. T. Ingle [et al.] // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.724304>
10. Composting of Mixture of Total Mixed Ration and Cow Manure: Quality of the Finished Compost / X. Bai [et al.] // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022. Vol. 5. P. 294–306. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00365-3>
11. Tóth F. A., Tamás J., Nagy P. T. Early Evaluation of Use of Fermented Chicken Manure Products in Practice of Apple Nutrient Management // *Acta Agraria Debreceniensis*. 2022. Vol. 1. P. 195–198. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/8502>
12. Gross A., Glaser B. Meta-Analysis on How Manure Application Changes Soil Organic Carbon Storage // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. Article no. 5516. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82739-7>
13. Cow Manure Application Effectively Regulates the Soil Bacterial Community in Tea Plantation / S. Zhang [et al.] // *BMC Microbiology*. 2020. Vol. 20. Article no. 190. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01871-y>
14. Effects of Short-Term Manure Nitrogen Input on Soil Microbial Community Structure and Diversity in a Double-Cropping Paddy Field of Southern China / H. Tang [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. Article no. 13540. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70612-y>
15. Antonious G. F., Turley E. T., Dawood M. H. Monitoring Soil Enzymes Activity Before and After Animal Manure Application // *Agriculture*. 2020. Vol. 10, no. 5. Article no. 166. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050166>
16. Effects of Lime Amendment on the Organic Substances Changes, Antibiotics Removal, and Heavy Metals Speciation Transformation during Swine Manure Composting / Z. Chen [et al.] // *Chemosphere*. 2021. Vol. 262. Article no. 128342. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128342>
17. Manure Treatment According to the Trevi-Concept / E. Smet [et al.] // *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*. 2003. Vol. 68, issue 2, part A. P. 125–131. URL: https://www.researchgate.net/publication/8415127_Manure_treatment_according_to_the_Trevi-concept (дата обращения: 28.02.2023).
18. Phosphorus Recovery from Co-Digested Pig Slurry: Development of the RePeat Process / I. Regelink [et al.]. Wageningen : Wageningen Environmental Research. Report 2949, 2019. 66 p. <https://doi.org/10.18174/476731>

19. Hjorth M., Christensen M. L., Christensen P. V. Flocculation, Coagulation, and Precipitation of Manure Affecting Three Separation Techniques // *Bioresource Technology*. 2008. Vol. 99, no. 18. P. 8598–8604. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.009>
20. Fomicheva N. V., Rabinovich G. Yu. Technological Line for Processing Animal Waste // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. Article no. 052004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052004>
21. Nitrogen Recovery from Different Livestock Slurries with an Innovative Stripping Process / A. Heidarzadeh Vazifekhoran [et al.] // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article no. 7709. <https://doi.org/10.3390/su14137709>
22. Trends on Manure Processing in Europe / X. Flotats [et al.] // *Book of Proceedings, 2nd International Conference of WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*. Braga (Portugal), 11–13 September. Edition: CVR, Centro para a Valorizaçao de Residuos, 2013. P. 587–592.
23. Manure Processing as a Pathway to Enhanced Nutrient Recycling: Report of SuMaNu Platform / S. Luostarinen [et al.] // *Natural Resources and bioeconomy studies 62/2020*. Helsinki : Natural Resources Institute Finland. 2020. 76 p. URL: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/08/Manure-processing-as-a-pathway-to-enhanced-nutrient-recycling.pdf> (дата обращения: 28.02.2023).
24. Aguirre-Villegas H. A., Larson R., Reinemann D. J. From Waste-to-Worth: Energy, Emissions, and Nutrient Implications of Manure Processing Pathways // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2014. Vol. 8, issue 6. P. 770–793. <https://doi.org/10.1002/bbb.1496>
25. Manure Treatment and Recycling Technologies / R. Dong [et al.] // *Circular Economy and Sustainability / A. Stefanakis, I. Nikolaou (eds.)*. Vol. 2. Environmental Engineering. Elsevier, 2022. P. 161–180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821664-4.00009-1>
26. Knaut T. F., Schumacher Teixeira P. Impact of Embiofert Treatment in Swine Manure Treatment Ponds // *Journal of Engineering Research*. 2022. Vol. 2, no. 9. P. 1–10. <https://doi.org/10.22533/at.ed.317292207061>
27. Melse R. W., De Buissonjé F. E. Manure Treatment and Utilisation Options. Wageningen: Wageningen Livestock Research, 2020. 7 p. URL: <https://edepot.wur.nl/541798> (дата обращения: 28.02.2023).
28. Loyon L. Overview of Manure Treatment in France // *Waste Management*. 2017. Vol. 61. P. 516–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.040>
29. Microbiological Features and Bioactivity of a Fermented Manure Product (Preparation 500) Used in Biodynamic Agriculture / M. Giannattasio [et al.] // *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2013. Vol. 23, no. 5. P. 644–651. <https://doi.org/10.4014/jmb.1212.12004>
30. Management of Poultry Manure in Poland – Current State and Future Perspectives / D. Drózdź [et al.] // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 264. Article no. 110327. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110327>
31. Rayne N., Aula L. Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review // *Soil Systems*. 2020. Vol. 4, issue 4. Article no. 64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040064>
32. Manure Management and Soil Biodiversity: Towards More Sustainable Food Systems in the EU / J. D. Köninger [et al.] // *Agricultural Systems*. 2021. Vol. 194. Article no. 103251. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103251>
33. Шалавина Е. В., Уваров Е. В., Васильев Е. В. Методика расчета распределения общего азота и общего фосфора между фракциями свиного навоза // *Инженерные технологии и системы*. 2022. Т. 32, № 1. С. 54–70. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.054-070>
34. Розен А. М. Производство тяжелой воды методом ректификации аммиака с тепловым насосом. Опыт пуска промышленной установки // *Атомная энергия*. 1995. Т. 5. С. 221–229. URL: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t79-3_1995/go,68/ (дата обращения: 28.02.2023).
35. Максешко Л. М. Экобезопасная технология переработки навозных отходов животноводства с абсорбцией парниковых газов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 1. С. 205–209. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-205-209>

Поступила 02.03.2023; одобрена после рецензирования 02.04.2023; принята к публикации 12.04.2023

Об авторах:

Шалавина Екатерина Викторовна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, shalavinaev@mail.ru

Васильев Эдуард Вадимович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, sznii6@yandex.ru

Папушин Эдуард Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела анализа и прогнозирования экологической устойчивости агроэкосистем Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пос. Тярлево, Филътровское шоссе, д. 3), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7035-4654>, papushinea@yandex.ru

Заявленный вклад авторов:

Е. В. Шалавина – разработка методики; проведение расчетов; отбор проб; сравнение результатов.

Э. В. Васильев – постановка задачи; разработка методики.

Э. А. Папушин – формирование структуры статьи; анализ литературных источников по изучаемой проблематике.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Trifanov A.V., Kalyuga V.V., Bazykin V.I. [Current State and Trends of Pork Production in the Russian Federation]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2016;(90):5–14. (In Russ.) EDN: XELLCX
2. Vasilev E.V., Shalavina E.V. [Change in Nitrogen and Phosphorus Content during Biological Treatment of Liquid Fraction of Pig Manure]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2014;(85):146–150. (In Russ.) EDN: SYDQQR
3. Racewicz P., Ludwiczak A., Skrzypczak E., et al. Welfare Health and Productivity in Commercial Pig Herds. *Animals*. 2021;11(4):1176. <https://doi.org/10.3390/ani11041176>
4. Kariyama I.D., Zhai X., Wu B. Physical and Rheological Properties of Animal Manure: A Review. *Transactions of the ASABE*. 2018;61(3):1113–1120. <https://doi.org/10.13031/trans.12768>
5. Molinuevo-Salces B., Riaño B., Vanotti M.B., Hernández-González D. Pilot-Scale Demonstration of Membrane-Based Nitrogen Recovery From Swine Manure. *Membranes*. 2020;10(10):270. <https://doi.org/10.3390/membranes10100270>
6. Ten Hoeve M., Gómez-Muñoz B., Jensen L.S., Bruun S. Environmental Impacts of Combining Pig Slurry Acidification and Separation Under Different Regulatory Regimes – A Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*. 2016;181:710–720. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.028>
7. Chai K.F., Ng K.R., Samarasinghe M., Chen W.N. Precision Fermentation to Advance Fungal Food Fermentations. *Current Opinion in Food Science*. 2022;47:100881. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100881>
8. 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;1076:012042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1076/1/012042>
9. Ingle A.T., Fortney N.W., Walters K.A., Donohue T.J., Noguera D.R. Mixed Acid Fermentation of Carbohydrate-Rich Dairy Manure Hydrolysate. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021;9. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.724304>

10. Bai X., Liu J., Fu H., et al. Composting of Mixture of Total Mixed Ration and Cow Manure: Quality of the Finished Compost. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022;5:294–306 <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00365-3>
11. Tóth F.A., Tamás J., Nagy P.T. Early Evaluation of Use of Fermented Chicken Manure Products in Practice of Apple Nutrient Management. *Acta Agraria Debreceniensis*. 2022;(1):195–198. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/8502>
12. Gross A., Glaser B. Meta-Analysis on How Manure Application Changes Soil Organic Carbon Storage. *Scientific Reports*. 2021;11:5516. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82739-7>
13. Zhang S., Sun L., Wang Y., et al. Cow Manure Application Effectively Regulates the Soil Bacterial Community in Tea Plantation. *BMC Microbiology*. 2020;20:190. <https://doi.org/10.1186/s12866-020-01871-y>
14. Tang H., Li C., Xiao X., et al. Effects of Short-Term Manure Nitrogen Input on Soil Microbial Community Structure and Diversity in a Double-Cropping Paddy Field of Southern China. *Scientific Reports*. 2020;10:13540. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70612-y>
15. Antonious G.F., Turley E.T., Dawood M.H. Monitoring Soil Enzymes Activity Before and After Animal Manure Application. *Agriculture*. 2020;10(5):166. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050166>
16. Chen Z., Fu Q., Cao Y., Wen Q., Wu Y. Effects of Lime Amendment on the Organic Substances Changes, Antibiotics Removal, and Heavy Metals Speciation Transformation During Swine Manure Composting. *Chemosphere*. 2021;262:128342. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128342>
17. Smet E., Debruyne J., Deckx J., Deboosere S. Manure Treatment According to the Trevi-Concept. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*. 2003;68(2-A):125–131. Available at: https://www.researchgate.net/publication/8415127_Manure_treatment_according_to_the_Trevi-concept (accessed 28.02.2023).
18. Regelink I., Ehlert P., Smit G., Everlo S., Prinsen A., Schoumans O. Phosphorus Recovery from Co-Digested Pig Slurry: Development of the RePeat Process. Wageningen: Wageningen Environmental Research; 2019. <https://doi.org/10.18174/476731>
19. Hjorth M., Christensen M.L., Christensen P.V. Flocculation, Coagulation, and Precipitation of Manure Affecting Three Separation Techniques. *Bioresource Technology*. 2008;99(18):8598–8604. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.009>
20. Fomicheva N.V., Rabinovich G.Yu. Technological Line for Processing Animal Waste. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;677:052004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/677/5/052004>
21. Heidarzadeh Vazifekhoran A., Finzi A., Perazzolo F., Riva E., Ferrari O., Provolo G. Nitrogen Recovery from Different Livestock Slurries with an Innovative Stripping Process. *Sustainability*. 2022;14:7709. <https://doi.org/10.3390/su14137709>
22. Flotats X., Bonmati A., Palatsi J., Foged H.L. Trends on Manure Processing in Europe. In: Book of Proceedings, 2nd International Conference of WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities. Braga (Portugal), 11–13 September. Edition: CVR, Centro para a Valorização de Resíduos; 2013. p. 587–592.
23. Luostarinen S., Tampio E., Laakso J., et al. Manure Processing as a Pathway to Enhanced Nutrient Recycling: Report of Sumanu Platform. *Natural Resources and Bioeconomy Studies* 62/2020. Helsinki: Natural Resources Institute Finland; 2020. Available at: <https://helcom.fi/wp-content/uploads/2021/08/Manure-processing-as-a-pathway-to-enhanced-nutrient-recycling.pdf> (accessed 28.02.2023).
24. Aguirre-Villegas H.A., Larson R., Reinemann D.J. From Waste-To-Worth: Energy, Emissions, and Nutrient Implications of Manure Processing Pathways. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2014;8(6):770–793 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.006>
25. Dong R., Qiao W., Guo J., Sun H. Manure Treatment and Recycling Technologies. In: Stefanakis A., Nikolaou I. (eds.). *Circular Economy and Sustainability*. Vol. 2. Environmental Engineering. Elsevier; 2022. p. 161–180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821664-4.00009-1>
26. Knaul T.F., Schumacher Teixeira P. Impact of Embiofert Treatment in Swine Manure Treatment Ponds. *Journal of Engineering Research*. 2022;2(9):1–10. <https://doi.org/10.22533/at.ed.317292207061>
27. Melse R.W., De Buissonjé F.E. Manure Treatment and Utilisation Options. Wageningen: Wageningen Livestock Research; 2020. Available at: <https://edepot.wur.nl/541798> (accessed 28.02.2023).

28. Loyon L. Overview of Manure Treatment in France. *Waste Management*. 2017;61:516–520. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.040>
29. Giannattasio M., Vendramin E., Fornasier F., et al. Microbiological Features and Bioactivity of a Fermented Manure Product (Preparation 500) Used in Biodynamic Agriculture. *Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2013;23(5):644–651. <https://doi.org/10.4014/jmb.1212.12004>
30. Drózdź D., Wystalska K., Malińska K., Grosser A., Grobelak A., Kacprzak M. Management of Poultry Manure in Poland – Current State and Future Perspectives. *Journal of Environmental Management*. 2020;264:110327. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110327>
31. Rayne N., Aula L. Livestock Manure and the Impacts on Soil Health: A Review. *Soil System*. 2020;4(4):64. <https://doi.org/10.3390/soilsystems4040064>
32. Köninger J., Lugato E., Panagos P., Kochupillai M., Orgiazzi A., Briones M. J.I. Manure Management and Soil Biodiversity: Towards More Sustainable Food Systems in the EU. *Agricultural Systems*. 2021;194:103251. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103251>
33. Shalavina E.V., Uvarov R.A., Vasilev E.V. Calculation Methods of Total Nitrogen and Total Phosphorus Distribution in Pig Manure Fractions. *Engineering Technologies and Systems*. 2022;32(1):54–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.054-070>
34. Rosen A.M. Heavy Water Production by Ammonia Rectification with Heat Pump. The Experience of Industrial Plant Launching. *Atomnaya energiya*. 1995;(5):221–229. Available at: http://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t179-3_1995/go,68/ (accessed 28.02.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
35. Maksishko L.M. Eco-Friendly Technology for the Processing of Livestock Manure Waste with Greenhouse Gas Absorption. *Theoretical and Applied Ecology*. 2022;(1):205–209. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-205-209>

Submitted 02.03.2023; revised 02.04.2023; accepted 12.04.2023

About the authors:

Ekaterina V. Shalavina, Cand.Sci. (Engr.), Senior Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, shalavinaev@mail.ru

Eduard V. Vasilev, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, sznii6@yandex.ru

Eduard A. Papushin, Cand.Sci. (Engr.), Leading Researcher of the Department of Analysis and Forecasting of Environmental Sustainability of Agroecosystems, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7035-4654>, papushinea@yandex.ru

Authors contribution:

E. V. Shalavina – methodology development; calculations; sampling and sample analysis; comparison of results.

E. V. Vasilev – study concept and methodology development.

E. A. Papushin – article structuring; literature review.

All authors have read and approved the final manuscript.