

Научная статья

УДК 628.473: 631.95

DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-3-53-62

Аэробная твердофазная ферментация отходов птицефабрик как элемент функционирования устойчивой продовольственной системы

Р.А. Уваров*, М.И. Кременевская

Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург,
*rauvarov@itmo.ru

Аннотация. Изучена возможность ускоренной переработки отходов птицеводства и упаковочного материала (целлюлозы), определены режимные параметры технологических процессов и обоснованы показатели безопасности получаемой продукции. Изучен физико-химический состав бесподстилочного помета: массовая доля сухого вещества $26,98 \pm 0,30\%$, рН $7,4 \pm 0,30$, содержание органического углерода $38,0 \pm 0,80\%$, массовая доля общего азота $2,37 \pm 0,24\%$, аммонийного азота $0,87 \pm 0,10\%$, общего фосфора $1,31 \pm 0,13\%$ и общего калия $0,56 \pm 0,06\%$, установлено их несоответствие рекомендуемым значениям базовых параметров успешного протекания биотермических процессов. Исследование показателей микробиологической и паразитарной чистоты установило в исходном материале превышение индексов БГКП (1000) и энтерококков (1000), а также наличие *Proteus mirabilis*. Сальмонеллы, стафилококки, энтеропатогенные типы кишечной палочки, личинки и куколки синантропных мух, яйца и личинки гельминтов, цисты кишечных патогенных простейших не обнаружены. Для выравнивания физико-химического состава ферментируемого материала добавлен измельченный гофрокартон в соотношении 4,5:1. Полученная смесь соответствует влажности $64 \pm 0,36\%$, рН $7,2 \pm 0,25$, углеродо-азотный баланс 21:1, плотность $700 \pm 0,70$ кг/м³. Зафиксировано устойчивое протекание мезофильных биотермических процессов: $34 \pm 3^\circ\text{C}$, максимальная температура $36 \pm 1^\circ\text{C}$ достигнута на пятые сутки ферментации. По истечении семи суток проведена выгрузка экспериментального субстрата. Установлено снижение индекса БГКП до допустимых пределов (1–9) и десятикратное снижение индекса энтерококков (100), однако превышение данного показателя и наличие *Proteus mirabilis* не позволяет утверждать о безопасности полученного субстрата при использовании в качестве органического удобрения.

Ключевые слова: переработка отходов; продовольственная система; твердофазная ферментация; помет; компост; микробиологическая и паразитарная чистота

Original article

Aerobic solid-state fermentation of poultry farm waste as an element of a sustainable food system functioning

Roman A. Uvarov*, Marianna I. Kremenevskaya

ITMO University, St. Petersburg, Russia,
*rauvarov@itmo.ru

Abstract. Within the framework of the study, the possibility of accelerated processing poultry waste and packaging material (cellulose) was studied, the operating parameters of technological processes were determined, and the safety indicators for the products obtained were substantiated. The physicochemical composition of the poultry manure was studied: the mass of dry fraction $26.98 \pm 0.30\%$; pH 7.4 ± 0.30 ; organic carbon content $38.0 \pm 0.80\%$; mass fraction of total nitrogen $2.37 \pm 0.24\%$; ammonium nitrogen $0.87 \pm 0.10\%$, total phosphorus $1.31 \pm 0.13\%$, and total potassium $0.56 \pm 0.06\%$; their discrepancy with the recommended values of the basic parameters for the successful biothermal processes was established. The study of the indicators for microbiological and parasitic purity established the excess of the indices of coliforms (1000) and enterococcus (1000) in the original material, as well as the presence of *Proteus mirabilis*. Salmonella, staphylococcus, enteropathogenic types of *E. coli*, larvae and pupae of synanthropic flies, eggs and larvae of helminths, intestinal pathogenic protozoa cysts were not found. To equalize the physico-chemical composition of the fermented material, crushed corrugated cardboard was added in the ratio (4.5:1). The resulting mixture corresponds to a humidity of $64 \pm 0.36\%$, a pH of 7.2 ± 0.25 , a carbon-nitrogen balance of 21:1, and a density of 700 ± 0.70 kg/m³. As a result of experimental studies, a steady course of mesophilic biothermal processes was recorded: $34 \pm 3^\circ\text{C}$, the maximum temperature of $36 \pm 1^\circ\text{C}$ was reached on the 5th day of fermentation. After 7 days, the experimental substrate was unloaded. A decrease in the coliforms index to acceptable limits (1–9) and a tenfold decrease in the enterococcus index (100) were found, however, exceeding this indicator and the presence of *Proteus mirabilis* does not allow us to assert the safety of the obtained substrate for use as an organic fertilizer.

Keywords: waste processing; food system; solid-state fermentation; poultry manure; compost; microbial and parasitic quality

Введение

Механизмы и прогнозирование трансформаций сельскохозяйственного сырья, формирование и развитие устойчивых продовольственных систем невозможно без качественной подготовки почвы для производственных потребностей растениеводства – начального этапа жизненного цикла продуктов питания.

В рамках обеспечения продовольственной безопасности одним из целевых направлений развития экономики является модернизация отрасли птицеводства [1; 2]. Строительство новых комплексов и расширение отечественной племенной базы привело к значительному росту ключевых показателей, в частности поголовья: за период 2000–2020 годов общее поголовье сельскохозяйственной птицы в России увеличилось с 340,66 до 519,78 млн голов (на 52,6%)¹. При этом в регионах-лидерах увеличение поголовья значительно превысило средние показатели: например, в Ленинградской области поголовье птицы выросло с 13,25 млн голов в 2000 году до 30,25 млн голов в 2020 году (на 128,2%). Это, а также внедрение новых технологий содержания и кормления, привели к резкому увеличению образуемых отходов, в частности помета [3–5]. Существующие логистические связи между растениеводческими и птицеводческими предприятиями не способны своевременно перерабатывать образуемые отходы и использовать их в качестве органического удобрения в актуальные для региона агротехнические сроки [6]. Все это приводит к тому, что помет скапливается в локальных точках, нанося непоправимый ущерб окружающей среде, выделяя CO₂ и NH₃ в атмосферу и просачиваясь в грунтовые воды [7–9]. Согласно оценкам экспертов, годовой выход птичьего помета в Ленинградской области в среднем составляет до 1,5 млн тонн [6; 10]. Современные птицеводческие комплексы являются предприятиями закрытого типа, на которых не только производятся яйца и выращиваются бройлеры, но и фасуется готовая продукция. Использование большого количества упаковочного материала приводит к образованию отходов целлюлозы – макулатуры и гофрокартона².

Возвращение максимально возможного количества ресурсов в производственно-технологические циклы является базовым принципом циркулярной экономики. Комплексная переработка отходов агропромышленного и потребительского секторов в органическое удобрение позволяет не только уменьшить их количество и снизить негативное воздействие на окружающую среду, но и повысить устойчивость продовольственных систем: качественное удобрение способствует эффективному производству растениеводческой продукции – основы качественных продуктов питания [11; 12].

Выбор наиболее подходящей и эффективной технологии переработки органических отходов зависит от ряда факторов: физико-химического состава исходных материалов, требований к конечному продукту, природно-климатических условий, материально-технической базы предприятия и прочее. Бесподстилочный куриный помет обладает высоким содержанием питательных веществ, в среднем, в 4–6 раз превышающим аналогичные показатели других видов сельскохозяйственных отходов: навоза крупного рогатого скота и свиного навоза [13; 14], поэтому основной задачей при переработке данного вида отходов является сокращение эмиссии и максимальное сохранение питательной ценности получаемого удобрения. Влажность отходов является одним из лимитирующих факторов при их переработке. Для подстилочного помета этот показатель варьируется в диапазоне 55–70%, в отдельных случаях достигая 80%, поэтому для его переработки преимущественно применяются технологии, ориентированные на твердые отходы (при условии разделения на фракции или добавлении влагопоглотителя): компостирование, аэробная ферментация в установках закрытого типа, термическая и вакуумная сушка, пиролиз [15–17].

В рамках многочисленных исследований европейских и российских научных коллективов установлено, что в природно-климатических условиях севера Евразии, к которым относится Северо-Западный федеральный округ РФ, наиболее перспективны технологии, нивелирующие воздействие внешних погодных факторов и позволяющие перерабатывать отходы с приемлемыми затратами, высокой

¹Поголовье скота и птицы в хозяйствах всех категорий. Единая межведомственная информационно-статистическая система ЕМИСС. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31325> (дата обращения 20.07.2022)

²Образование, использование, обезвреживание и размещение отходов производства и потребления в Российской Федерации. Росстат. URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/oxr_otxod3.xls (дата обращения 17.07.2022)

интенсивностью и минимальной эмиссией биогазов, например, аэробная ферментация в установках закрытого типа [18–22]. Основные компоненты помётных компостов, применяемые при ферментации, торф, опилки или измельченная солома [23–26]. Возможность комплексной переработки куриного помёта и отходов упаковочного материала (гофрокартона) методом аэробной твердофазной ферментации, актуальная для многих птицефабрик, не исследована в достаточной мере.

С учетом этого, целью настоящих исследований является изучение возможности ускоренной переработки отходов птицеводства и целлюлозы, определение режимных параметров, обоснование и регламентирование показателей безопасности пищевой продукции.

Объекты и методы исследования

Объекты изучения – компостируемая смесь на основе бесподстилочного куриного помёта и измельченного гофрокартона.

Исследованы основные параметры физико-химического состава помёта (массовая доля сухого вещества методом высушивания в термостате с естественной конвекцией BinderBD-400 (Германия), рН – преобразователь ионометрический И-500 (Россия), содержание органического углерода, массовая доля общего азота, аммонийного азота, общего фосфора и общего калия с использованием спектрофотометра Snimadzu UV-2100 (Япония), фотометра пламенного автоматического ФПА-2-01 (Россия), центрифуги ULABUS-1536E (КНР)) и показатели микробиологической и паразитарной чистоты (индекс БГКП (колиформы), индекс энтерококков, наличие протей, сальмонеллы, стафилококков, энтеропатогенных типов кишечной палочки, личинок и куколок синантропных мух, жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, цист кишечных патогенных простейших) с помощью инкубатора Shellab GI 6-2 (США). Взвешивание и перемешивание образцов проводили на лабораторных электронных весах Adventurer AR5120 (Швейцария), весах неавтоматического действия SQP (Германия) и автоматическом и механическом дозаторах ВЮНИТ Sartorius (Германия).

Эксперименты проводились с трехкратной повторностью в лабораторном экспресс-ферментаторе закрытого типа: 1 – камера биоферментатора; 2 – съемная крышка; 3 – перфорированная пластина; 4 – аэрационная труба; 5 – патрубок воздушного компрессора; 6 – перемешиватель материала; 7 – съемная рукоятка; 8 – заглушки; 9 – отверстия для замера температуры (рисунок 1).

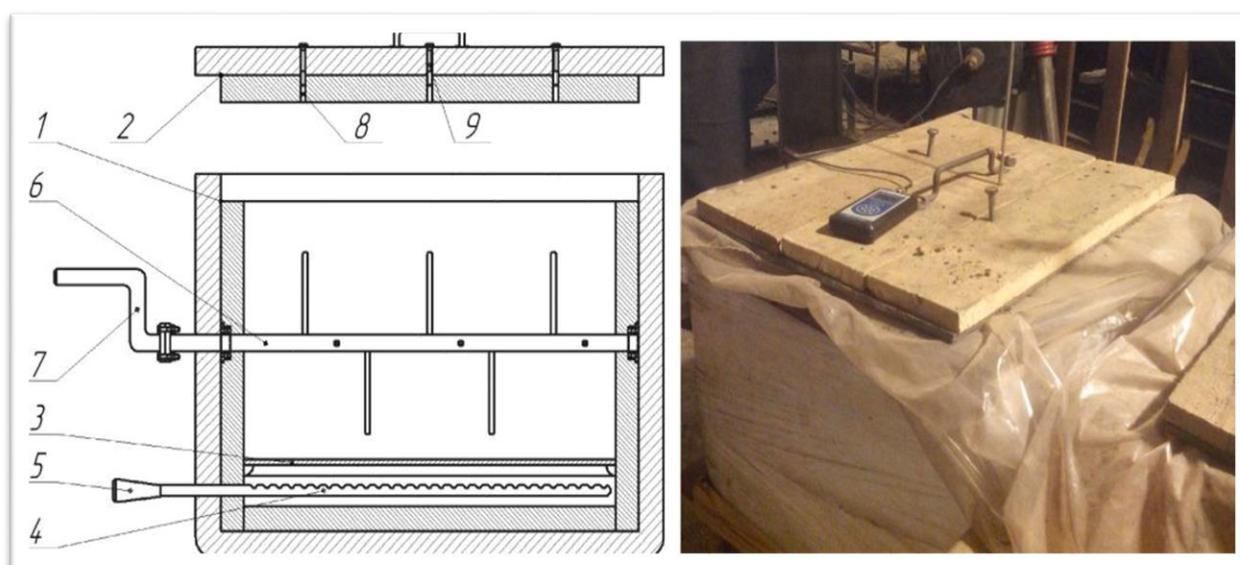


Рисунок 1 – Лабораторный экспресс-ферментатор закрытого типа
Figure 1. Laboratory express-fermenter of the closed type

Выбранный режим функционирования лабораторного оборудования апробирован при переработке компоста на основе подстилочного куриного помёта: скорость аэрации – 7,5 м/с; продолжительность аэрации – 6 мин/ч; интервал ворошения – 12 ч [27]. При расчетах использовали методы параметрической статистики (на основе средних значений и их стандартных ошибок $\pm SEM$, 95% доверительных интервалов

и t -критерия Стьюдента). Статистический анализ полученных результатов проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel 2016, IBM SPSS Statistics 21 и Statistica 6.0 (StatSoftInc.).

Результаты и их обсуждение

В результате проведенной аналитической и экспериментальной работы установлено несоответствие основных показателей физико-химического состава исходного помета (таблица 1) рекомендуемым значениям базовых факторов протекания биотермических процессов с удовлетворительной интенсивностью (таблица 2) [28; 29].

Таблица 1. Физико-химический состав исходного куриного помета
Table 1. Physico-chemical composition of the original chicken manure

Наименование показателя	Результат испытаний
массовая доля сухого вещества, %	26,98±0,30
pH в солевой вытяжке, ед. pH	7,4±0,30
содержание органического углерода, %	38,0±0,80
массовая доля общего азота, % на н.в.	2,37±0,24
массовая доля аммонийного азота, % на н.в.	0,87±0,10
массовая доля общего фосфора, % на н.в.	1,31±0,13
массовая доля общего калия, % на н.в.	0,56±0,06

Таблица 2. Оценка соответствия базовым параметрам успешного протекания биотермических процессов
Table 2. Comparison of the basic parameters for the biothermic processes with their reference values

Наименование показателя	Исходный помет	Рекомендуемые значения
влажность, %	77±0,30	55–65
pH в солевой вытяжке, ед. pH	7,4±0,30	7,0–8,5
углеродо-азотный баланс (соотношение C:N)	15,8:1	(20–30):1
плотность, кг/м ³	780±0,80	500–700

Для выравнивания физико-химического состава и свойств перерабатываемого материала в качестве влагопоглощающего компонента добавлен измельченный гофрокартон, обладающий низкой исходной влажностью (6,74±0,10 %), высоким содержанием углерода (44,2±0,80%) и пористостью (62,4±0,60%).

Масса влагопоглотителя на 1 кг помета, необходимая для получения компостной смеси с влажностью, пригодной для ферментации, определялась по формуле

$$Q_b = \frac{W_n - W_c}{W_c - W_b},$$

где Q_b – масса влагопоглотителя на 1 кг исходного материала, кг;

W_n – влажность помета, %;

W_c – влажность компостной смеси, %

W_b – влажность влагопоглотителя, %.

Аналогично определены значения pH, соотношения (C:N) и плотности компостируемой смеси. Оптимальные значения установлены в соответствии с критерием Парето. Определено, чтобы полученная компостная смесь могла быть переработана методом аэробной твердофазной ферментации, на 1 кг исходного помета требуется добавление 0,22 кг измельченного гофрокартона. В таком случае компостная смесь будет обладать следующими параметрами: влажность 64 ± 0,36%; pH 7,2 ± 0,25; углеродо-азотный баланс (соотношение C:N): 21:1; плотность 700 ± 0,7 кг/м³.

При проведении поисковых исследований в одной повторности использовано 36,5 кг исходного помета и 8 кг измельченного гофрокартона. Полученные 44,5 кг близки к минимальному значению критической компостируемой массы, при котором биотермические процессы пройдут с достаточной степенью интенсивности – 60 кг. Перемешивание компостной смеси производилось небольшими партиями для лучшей гомогенизации материала (рисунок 2), после чего ее загружали в экспресс-ферментатор.



Рисунок 2 – Определение массы гофрокартона
Figure 2. Weighting corrugated cardboard



Рисунок 3 – Подготовка компостной смеси
Figure 3. Compost mixture preparation

В ходе исследований установлено, что полученная компостная смесь разогревалась и поддерживала стабильную температуру (34 ± 3)°C, то есть в ней протекали устойчивые мезофильные биотермические процессы, однако динамика разогрева материала была недостаточной для успешного перехода процесса в термофильную (свыше +40°C) стадию (рисунок 4). Это не привело к гарантированному обеззараживанию материала от патогенной микрофлоры (таблица 3). Использование полученного субстрата в качестве органического удобрения для повышения плодородия почв и увеличения урожайности при производстве растениеводческой продукции требует внедрение дополнительных технологических операций при утилизации или увеличения продолжительности ферментации.

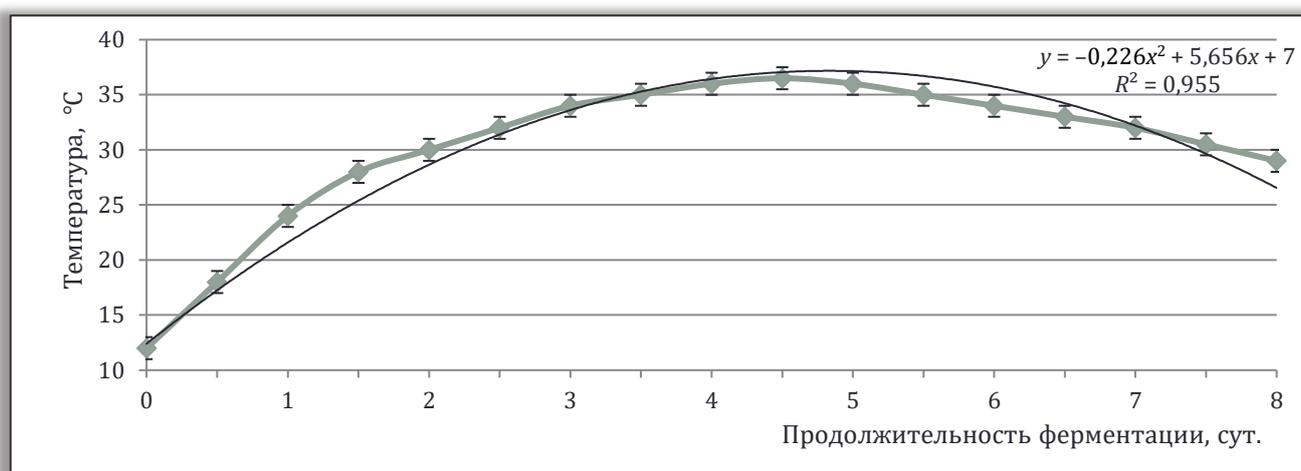


Рисунок 4 – Динамика изменения температуры ферментируемой смеси
Figure 4. Dynamics for the temperature of the fermented mixture

Таблица 3. Показатели микробиологической и паразитарной чистоты исходного куриного помета и экспериментального субстрата

Table 3. The indicators of microbiological and parasitic purity for the original chicken manure and experimental substrate

Наименование показателя	Исходный помет	Экспериментальный субстрат	Допустимые значения
индекс БГКП	1000	1–9	1–9
индекс энтерококков	1000	100	1–9
протей	выделена культура патогенного <i>Proteus mirabilis</i>	выделена культура патогенного <i>Proteus mirabilis</i>	не допускается
сальмонеллы	не выделено в 1 г	не выделено в 1 г	не допускается
стафилококки	не выделено в 1 г	не выделено в 1 г	не допускается
энтеропатогенные типы кишечной палочки	не выделено в 1 г	не выделено в 1 г	не допускается
личинки и куколки синантропных мух	не обнаружены	не обнаружены	не допускается
жизнеспособные личинки гельминтов	не обнаружены	не обнаружены	не допускается
жизнеспособные яйца гельминтов	не обнаружены	не обнаружены	не допускается
цисты кишечных патогенных простейших	не обнаружены	не обнаружены	не допускается

Превышение допустимого содержания энтерококков и наличие культуры патогенного *Proteus mirabilis* может быть обусловлено как недостаточной критической массой компостируемой смеси, так и относительно крупной фракцией измельченного картона, выступающего в роли влагопоглотителя. Однако, экспериментально установлено, что данный материал может применяться для переработки бесподстилочного куриного помета. Это находит отражение в исследованиях других научных групп по смежной тематике [30–32]. Вариативность физико-химического состава компоста, достигаемая при использовании гофрокартона, позволяет рассматривать его, в том числе, как субстрат для выращивания личинок мух или червей, которые могут быть использованы для дальнейшей переработки органических отходов [33; 34].

Заключение

При формировании новых принципов построения технологических циклов, обеспечивающих рециклинг сельскохозяйственного сырья в производстве животноводства и растениеводства, необходимо исследование не только сырьевых ресурсов, режимных процессов при создании этапов жизненного цикла пищевых систем и продукции, но и конструктивная проработка аппаратного оформления этих процессов. Северо-Запад России, являясь одним из наиболее развитых птицеводческих регионов, не может в полной мере обеспечить продукцией растениеводства в том числе из-за бедности местных почв. Увеличение их плодородия является одной из ключевых задач построения устойчивых продовольственных систем, а возвращение отходов в виде вторичных ресурсов в смежные технологические циклы – базовым принципом циркулярной экономики.

В природно-климатических условиях Северо-Запада России для утилизации органических отходов в приоритетном порядке следует рассматривать технологии термической переработки в установках закрытого типа, как наименее подверженную влиянию внешних погодных факторов и обеспечивающую переработку в относительно сжатые сроки с минимальной нагрузкой на окружающую среду.

В результате аналитической работы установлено, что исходный бесподстилочный куриный помет не может перерабатываться с высокой эффективностью в силу неоптимального физико-химического состава. В качестве одного из вариантов добавок для приведения состава компостной смеси к оптимальным показателям рассмотрен измельченный гофрокартон. Установлено, что для этого необходимо добавление измельченного гофрокартона из расчета 0,22 кг на 1 кг исходного помета.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что полученная компостная смесь разогревалась и поддерживала стабильную температуру (34 ± 3)°C, что однако не является достаточным

для гарантированного обеззараживания помета: не достигнуты допустимые значения индекса энтерококков и наличия протей. Также не удалось установить воздействия на сальмонеллы, стафилококков, энтеропатогенных типов кишечной палочки, личинок и куколок синантропных мух, жизнеспособных яиц и личинок гельминтов, цист кишечных патогенных простейших в силу их отсутствия в исходном помете.

Выдвигается предположение, что измельчение гофрокартона на более мелкие (не более 3 мм) фракции и увеличение массы перерабатываемого материала позволит перевести процесс ферментации в устойчивую термофильную стадию, что, в свою очередь, позволит гарантировать обеззараживание помета и его дальнейшее применение в качестве органического удобрения. Данная гипотеза будет изучена в дальнейших работах.

Литература

1. Буяров А.В., Буяров В.С. Роль отрасли птицеводства в обеспечении продовольственной безопасности России // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 7. С. 84–95.
2. Фисинин В.И. Мировое и российское птицеводство: реалии и вызовы будущего. М: Хлебпродинформ, 2019. 470 с.
3. Трухачев В.И., Епимахова Е.Э., Злыднев Н.З. Обозначены векторы развития птицеводства // Птицеводство. 2019. № 2. С. 12–15.
4. Зыков С.А. Современные тенденции развития птицеводства // Эффективное животноводство. 2019. № 4. С. 51–54.
5. Федорова Е.С., Станишевская О.И., Дементьева Н.Ю. Современное состояние и проблемы племенного птицеводства в России (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2020. № 3. С. 217–232. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.3.217-232.
6. Брюханов А.Ю., Шалавина Е.В., Воробьева Е.А., Васильева Н.С., Минин В.Б. Экологическое состояние животноводства и птицеводства Ленинградской области // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 3. С. 121–130. DOI: 10.24411/0131-5226-2019-10194.
7. Oliveira M.D., Sousa F.C., Saraz J.O., Calderano A.A., Tinôco I.F.F., Carneiro A.P.S. Ammonia emission in poultry facilities: A review for tropical climate areas. *Atmosphere*. 2021, V. 12, no. 9, article 1091. DOI: 10.3390/atmos12091091.
8. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Kozlova N.P., Shalavina E., Subbotin I., Lukin S. Environmental assessment of livestock farms in the context of BAT system introduction in Russia. *Journal of Environmental Management*. 2019, V. 246, pp. 283–288. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.105.
9. Гриднев П.И., Гриднева Т.Т. Потери азота при различных технологиях хранения и подготовки навоза к использованию // Техника и технологии в животноводстве. 2018. № 4. С. 111–120.
10. Брюханов А.Ю., Воробьева Е.А., Васильев Э.В., Обломкова Н.С., Шалавина Е.В., Васильева Н.С. Оценка сельскохозяйственного производства Ленинградской области на соответствие экологическим критериям ХЕЛКОМ // АгроЭкоИнженерия. 2020. № 4. С. 113–126. DOI: 10.24411/0131-5226-2020-10271.
11. Corato U.D. Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: A review under the perspective of a circular economy. *Science of the Total Environment*. 2020, V. 738, article 139840. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139840.
12. Chojnacka K., Moustakas K., Witek-Krowiak A. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. *Bioresour Technol*. 2020, V. 295, article 122223. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122223.
13. Теучеж А.А. Химический состав различных видов навоза // Экологический вестник Северного Кавказа. 2018. Т. 14. № 1. С. 54–58.
14. Kelleher B.P., Leahy J.J., Henihan A.M., O'Dwyer T.F., Sutton D., Leahy M.J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresour Technol*. 2002, V. 83, no. 1, pp. 27–36. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00133-X.
15. Брюханов А.Ю. Обеспечение экологической безопасности животноводческих и птицеводческих предприятий. Наилучшие доступные технологии. СПб: ИАЭП, 2017. 296 с.
16. Mengqi Z., Shi A., Ajmal M., Ye L., Awais M. Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting. *Biomass Conv. Bioref*. 2021. DOI 10.1007/s13399-021-01438-5.
17. Спиридонова А.В., Друзьянова В.П., Осмонов О.М., Тарабукина О.К., Сивцева Ж.Г. Пиролизная технология – перспективный способ утилизации твердого высушенного навоза // Дальневосточный аграрный вестник. 2022. № 1. С. 143–150. DOI: 10.24412/1999-6837-2022-1-143-150.
18. Уваров Р.А., Шалавина Е.В., Васильев Э.В. Технологии утилизации навоза в регионе Балтийского моря: анализ и наметившиеся тенденции // АгроЭкоИнженерия. 2021. № 3. С. 117–128. DOI: 10.24412/2713-2641-2021-3108-117-128.

19. Neumann S., Zacharias M., Stauss R., Foged H.L. (Eds). Baltic slurry acidification: Market potential analysis. Uppsala, RISE Research Institutes of Sweden, 2017. 140 p.
20. Salomon E., Tidåker P., Nilsson S.B. Flows and budgets of nutrients and potentially toxic elements on four Swedish organic farms using digestate from agricultural residues. *Organic Agriculture*. 2022, V. 12, pp. 279–292. <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00393-3>.
21. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N., Shalavina E. Assessment of nitrogen flows at farm and regional level when developing the manure management system for large-scale livestock enterprises in North-West Russia. *Sustainability*. 2021, V. 13, no. 12, article 6614. DOI: 10.3390/su13126614.
22. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Study results of mass and nutrient loss in technologies of different composting rate: case of bedding poultry manure. *Engineering for Rural Development*. 2016, V. 15, pp. 851–857.
23. Kebibeche H., Khelil O., Kacem M., Kaid-Harche M. Addition of wood sawdust during the co-composting of sewage sludge and wheat straw influences seeds germination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019, V. 168, pp. 423–430. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.10.075.
24. Кокунова И.В., Немчинова Т.В. Исследование влияния базового состава органических компостов на основе навоза на однородность компостных смесей // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 4. С. 37–43.
25. Zainudin M.H., Mustapha N.A., Maeda T., Ramli N., Sakai K., Sakai M. Biochar enhanced the nitrifying and denitrifying bacterial communities during the composting of poultry manure and rice straw. *Waste Management*. 2020, V. 106, pp. 240–249. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.03.029.
26. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Production of organic fertilisers as a way to improve economic efficiency of small farms. *Engineering for Rural Development*. 2021, V. 20, pp. 508–513. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF104.
27. Уваров П.А. Биоферментация помета в установках закрытого типа // Птицеводство. 2016. № 10. С. 53–56.
28. Guo R., Li G., Jiang T., Schuchardt F., Chen T., Zhao Y., Shen Y. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*. 2012, V. 112, pp. 171–178. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.099.
29. Sayara T., Basheer-Salimia R., Hawamde F., Sánchez A. Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy*. 2020, V. 10, no. 1, article 1838. DOI: 10.3390/agronomy10111838.
30. Hidalgo D., Martín-Marroquín J.M., Corona F. A multi-waste management concept as a basis towards a circular economy model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, V. 111, no. 1, pp. 481–489. DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.048.
31. Vujovic S., Stanisavljevic N., Fellner J., Tosica N., Ledererb J. Biodegradable waste management in Serbia and its implication on P flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020, V. 161, article 104978. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104978.
32. Soe K.H., Ngwe K., Soe Y.M., Win K.K., Oo A.N. Effect of different raw materials with poultry manure on composting for rubber nursery production. *Open Access Library Journal*. 2022, V. 9, no. 3, pp. 1–15. DOI: 10.4236/oalib.1108491.
33. Rumbos C.I., Karapanagiotidis I.T., Mente E., Athanassiou C. The lesser mealworm *Alphitobius diaperinus*: a noxious pest or a promising nutrient source? *Reviews in Aquaculture*. 2019, V. 11, no. 4, pp. 1418–1437. DOI: 10.1111/raq.12300.
34. Miranda C.D., Cammack J.A., Tomberlin J.K. Mass production of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae) reared on three manure types. *Animals*. 2020, V. 10, no. 7, article 1243. DOI: 10.3390/ani10071243.

References

1. Buyarov A.V., Buyarov V.S. The role of the poultry industry in ensuring food security in Russia. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2020, no. 7, pp. 84–95. (In Russian)
2. Fisinin V.I. *World and Russian poultry farming: realities and challenges of the future*. Moscow, Khlebprodinform Publ., 2019. 470 p. (In Russian)
3. Trukhachev V.I., Epimakhova E.E., Zlydnev N.Z. Russian poultry production: the vectors of development. *Ptitsevodstvo*. 2019, no. 2, pp. 12–15. (In Russian)
4. Zykov S.A. Current trends in the development of poultry breeding. *Effektivnoe zhitovnovodstvo*. 2019, no. 4, pp. 51–54. (In Russian)
5. Fedorova E.S., Stanishevskaya O.I., Demytyeva N.V. Current state and problems of poultry breeding in Russia (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2020, no. 3, pp. 217–232. DOI: 10.30766/2072-9081.2020.21.3.217-232. (In Russian)
6. Briukhanov A.Yu., Shalavina E.V., Vorobyeva E.A., Vasileva N.S., Minin V.B. Survey of livestock and poultry farming in leningrad region in terms of their environmental impact. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhitovnovodstva*. 2019, no. 3, pp. 121–130. DOI: 10.24411/0131-5226-2019-10194. (In Russian)

7. Oliveira M.D., Sousa F.C., Saraz J.O., Calderano A.A., Tinôco I.F.F., Carneiro A.P.S. Ammonia emission in poultry facilities: A review for tropical climate areas. *Atmosphere*. 2021, V. 12, no. 9, article 1091. DOI: 10.3390/atmos12091091.
8. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Kozlova N.P., Shalavina E., Subbotin I., Lukin S. Environmental assessment of livestock farms in the context of BAT system introduction in Russia. *Journal of Environmental Management*. 2019, V. 246, pp. 283–288. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.05.105.
9. Gridnev P.I., Gridneva T.T. The loss of nitrogen at various technologies of manure storage and preparation for using. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*. 2018, no. 4, pp. 111–120. (In Russian)
10. Briukhanov A.Yu., Vorobyeva E.A., Vasilev E.V., Oblomkova N.S., Shalavina E.V., Vasileva N.S. Assessing the agricultural production in Leningrad region for compliance with HELCOM environmental criteria. *AgroEcoInzheneriya*. 2020, no. 4, pp. 113–126. DOI: 10.24411/0131-5226-2020-10271. (In Russian)
11. Corato U.D. Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: A review under the perspective of a circular economy. *Science of the Total Environment*. 2020, V. 738, article 139840. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139840.
12. Chojnacka K., Moustakas K., Witek-Krowiak A. Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy. *Bioresource Technology*. 2020, V. 295, article 122223. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122223.
13. Teuchezh A.A. The chemical composition of various types of manure. *The North Caucasus Ecological Herald*. 2018, V. 14, no. 1, pp. 54–58. (In Russian)
14. Kelleher B.P., Leahy J.J., Henihan A.M., O'Dwyer T.F., Sutton D., Leahy M.J. Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*. 2002, V. 83, no. 1, pp. 27–36. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00133-X.
15. Briukhanov A.Yu. *Ensuring the environmental safety of livestock and poultry enterprises* (Best available technologies). St. Petersburg, IEEP Publ., 2017. 294 p. (In Russian)
16. Mengqi Z., Shi A., Ajmal M., Ye L., Awais M. Comprehensive review on agricultural waste utilization and high-temperature fermentation and composting. *Biomass Conv. Bioref.* 2021. DOI 10.1007/s13399-021-01438-5.
17. Spiridonova A. V., Druz'yanova V. P., Osmonov O. M., Tarabukina O. K., Sivtseva Zh. G. Pyrolysis technology – a promising way of dried manure solids utilization. *Far East Agrarian Bulletin*. 2022, no. 1, pp. 143–150. DOI: 10.24412/1999-6837-2022-1-143-150. (In Russian)
18. Uvarov R.A., Shalavina E.V., Vasilev E. V. Manure utilisation technologies in the Baltic Sea Region: analysis and emerging trends. *AgroEcoInzheneriya*. 2021, no. 3, pp. 117–128. DOI: 10.24412/2713-2641-2021-3108-117-128. (In Russian)
19. Neumann S., Zacharias M., Stauss R., Foged H.L. (Eds). *Baltic slurry acidification: Market potential analysis*. Uppsala, RISE Research Institutes of Sweden, 2017. 140 p.
20. Salomon E., Tidåker P., Nilsson S.B. Flows and budgets of nutrients and potentially toxic elements on four Swedish organic farms using digestate from agricultural residues. *Organic Agriculture*. 2022, V. 12, pp. 279–292. <https://doi.org/10.1007/s13165-022-00393-3>.
21. Briukhanov A., Vasilev E., Kozlova N., Shalavina E. Assessment of nitrogen flows at farm and regional level when developing the manure management system for large-scale livestock enterprises in North-West Russia. *Sustainability*. 2021, V. 13, no. 12, article 6614. DOI: 10.3390/su13126614.
22. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Study results of mass and nutrient loss in technologies of different composting rate: case of bedding poultry manure. *Engineering for Rural Development*. 2016, V. 15, pp. 851–857.
23. Kebibeche H., Khelil O., Kacem M., Kaid-Harche M. Addition of wood sawdust during the co-composting of sewage sludge and wheat straw influences seeds germination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019, V. 168, pp. 423–430. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2018.10.075.
24. Kokunova I.V., Nemchinova T.V. Study of the influence of the basic composition of manure-based organic composts on the homogeneity of compost mixtures. *Izvestiya Velikolukskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*. 2019, no. 4, pp. 37–43. (In Russian)
25. Zainudin M.H., Mustapha N.A., Maeda T., Ramli N., Sakai K., Sakai M. Biochar enhanced the nitrifying and denitrifying bacterial communities during the composting of poultry manure and rice straw. *Waste Management*. 2020, V. 106, pp. 240–249. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.03.029.
26. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Production of organic fertilisers as a way to improve economic efficiency of small farms. *Engineering for Rural Development*. 2021, V. 20, pp. 508–513. DOI: 10.22616/ERDev.2021.20.TF104.
27. Uvarov R.A. Bio-fermentation of poultry manure in closed installation. *Ptitsevodstvo*. 2016, no. 10, pp. 53–56. (In Russian)
28. Guo R., Li G., Jiang T., Schuchardt F., Chen T., Zhao Y., Shen Y. Effect of aeration rate, C/N ratio and moisture content on the stability and maturity of compost. *Bioresource Technology*. 2012, V. 112, pp. 171–178. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.02.099.
29. Sayara T., Basheer-Salimia R., Hawamde F., Sánchez A. Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy*. 2020, V. 10, no. 1, article 1838. DOI: 10.3390/agronomy10111838.

30. Hidalgo D., Martín-Marroquín J.M., Corona F. A multi-waste management concept as a basis towards a circular economy model. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019, V. 111, no. 1, pp. 481–489. DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.048.
31. Vujovic S., Stanisavljevic N., Fellner J., Tosica N., Ledererb J. Biodegradable waste management in Serbia and its implication on P flows. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020, V. 161, article 104978. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104978.
32. Soe K.H., Ngwe K., Soe Y.M., Win K.K., Oo A.N. Effect of different raw materials with poultry manure on composting for rubber nursery production. *Open Access Library Journal*. 2022, V. 9, no. 3, pp. 1–15. DOI: 10.4236/oalib.1108491.
33. Rumbos C.I., Karapanagiotidis I.T., Mente E., Athanassiou C. The lesser mealworm *Alphitobius diaperinus*: a noxious pest or a promising nutrient source? *Reviews in Aquaculture*. 2019, V. 11, no. 4, pp. 1418–1437. DOI: 10.1111/raq.12300.
34. Miranda C.D., Cammack J.A., Tomberlin J.K. Mass production of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae) reared on three manure types. *Animals*. 2020, V. 10, no. 7, article 1243. DOI: 10.3390/ani10071243.

Информация об авторах

Роман Алексеевич Уваров – канд. техн. наук, доцент факультета экотехнологий
Марианна Игоревна Кременевская – д-р техн. наук, доцент факультета биотехнологий

Information about the authors

Roman A. Uvarov, Ph. D., Associate Professor of the Faculty of Ecotechnology
Marianna I. Kremenevskaya, Dr. Sci., Associate Professor of the Faculty of Biotechnology

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 16.08.2022
Одобрена после рецензирования 20.09.2022
Принята к публикации 26.09.2022

The article was submitted 16.08.2022
Approved after reviewing 20.09.2022
Accepted for publication 26.09.2022