



## Методика расчета распределения общего азота и общего фосфора между фракциями свиного навоза

Е. В. Шалавина, Р. А. Уваров, Э. В. Васильев\*

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

\* [sznii6@yandex.ru](mailto:sznii6@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Цель исследования – разработка комплексной методики расчета и ее апробация на материале пилотных свинокомплексов для подтверждения достоверности расчетов. Методика необходима для объективного учета движения питательных веществ на уровне хозяйства и корректировки доз внесения полученного твердого и жидкого органического удобрения на основе применяемых севооборотов, агрохимического анализа почв и конкретных культур для получения запланированного урожая.

**Материалы и методы.** Расчеты содержания общего азота и общего фосфора в свином навозе до сепарации и в полученных твердой и жидкой фракциях осуществляли по разработанной методике. При этом использовали коэффициенты из соответствующих нормативных документов и результатов предыдущих исследований. Отбор исходного материала проводили в трех повторах на двух свинокомплексах замкнутого цикла, расположенных в Ленинградской области. Экспериментальные данные были статистически обработаны в программе StatGraphics Centurion v.16.

**Результаты исследования.** Рассчитанные значения содержания питательных элементов в навозе до сепарации и в его твердой и жидкой фракциях сравнили с результатами лабораторных исследований физико-химического состава навоза и его фракций, полученных на выбранных свиноводческих комплексах. Разница между расчетными и средними фактическими значениями по всем рассмотренным показателям не превышала 10 %, причем различия по азоту оказались намного больше (до 10 %), чем различия по фосфору (до 5,7 %) в твердой и жидкой фракциях свиного навоза.

**Обсуждение и заключение.** Выявленные различия можно объяснить допустимой погрешностью приборов и неоднородностью исходного сырья – смеси экскрементов с технологической водой. Результаты исследования подтвердили, что разработанный метод достоверен и его можно использовать для учета питательных веществ в получаемых твердых и жидких органических удобрениях при расчете и корректировке доз их внесения под определенные культуры для получения заданного урожая и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

**Ключевые слова:** свиноводческий комплекс, навоз, сепарация, общий азот, общий фосфор, твердая фракция, жидкая фракция

**Благодарности:** авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.



*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Для цитирования:** Шалавина Е. В., Уваров Р. А., Васильев Э. В. Методика расчета распределения общего азота и общего фосфора между фракциями свиного навоза // Инженерные технологии и системы. 2022. Т. 32, № 1. С. 54–70. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.054-070>

*Original article*

## Calculation Methods of Total Nitrogen and Total Phosphorus Distribution in Pig Manure Fractions

**E. V. Shalavina, R. A. Uvarov, E. V. Vasilev\***

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

\* [sznii6@yandex.ru](mailto:sznii6@yandex.ru)

### **Abstract**

**Introduction.** The study aims to develop and test a comprehensive calculation methodology in a case study of pilot pig complexes to verify reliability of estimates. The methods are required for reliable tracking of the nutrients flow at the farm level and for adjusting the application doses of resulting solid and liquid organic fertilizers with due account for the crop rotation in place, agrochemical analysis of soils, and specific crops to obtain the target yields.

**Materials and Methods.** Calculations of the content of total nitrogen and total phosphorus in pig manure before separation and in resulting solid and liquid fractions were carried out by the developed method. At that, coefficients from corresponding normative documents and results of previous research were used. Samples of initial material were collected in three replications at two closed-cycle pig rearing complexes located in the Leningrad Region. The experimental data were statistically processed with StatGraphics Centurion v.16 software.

**Results.** The calculated nutrient content of the manure before separation and the separated solid and liquid fractions was compared with the results of laboratory analysis of the physicochemical composition of the manure and its fractions from the selected pig rearing complexes. The difference between the calculated and average actual values of all considered indicators did not exceed 10%, with the differences in nitrogen content turning out to be much bigger (up to 10%) than the differences in phosphorus content (up to 5.7%) in the solid and liquid fractions of pig manure.

**Discussion and Conclusion.** The identified differences can be explained by the instrumental uncertainty and heterogeneity of the analyzed initial material – a mixture of excrement and process water. The results of the study confirmed that the developed method is reliable, and it can be used to account for the nutrients in the solid and liquid organic fertilizers in calculating and adjusting doses for certain crops to produce expected yield and reduce the negative impact on the environment.

**Keywords:** pig-rearing complex, manure, separation, total nitrogen, total phosphorus, solid fraction, liquid fraction

**Acknowledgments:** The authors are grateful to the editors and reviewers for their attentive attitude to the article and for the indicated remarks, which improved its quality.

*The authors declare no conflict of interest.*

**For citation:** Shalavina E.V., Uvarov R.A., Vasilev E.V. Calculation Methods of Total Nitrogen and Total Phosphorus Distribution in Pig Manure Fractions. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2022; 32(1):54-70. doi: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.032.202201.054-070>

## Введение

Изменения, происходящие в свиноводстве, вносят существенные коррективы в отрасль животноводства и сельское хозяйство в целом. За последнее десятилетие общее поголовье свиней в России выросло на 49 %: с 17 251,4 тыс. голов в 2010 году до 25 850,1 тыс. голов в 2020 году<sup>1</sup>. Увеличение поголовья свиней ведет и к росту образуемых отходов, в частности навоза. С учетом уменьшения числа производителей и размещения основных мощностей производства на крупных свиноводческих комплексах многие предприятия активно внедряют технологии интенсивной переработки навоза, позволяющие повысить рациональный радиус транспортировки полученного органического удобрения и вторичных продуктов [1–3].

Свиной навоз, в силу применяемых технологий содержания животных и навозоудаления, а также особенностей своего физико-химического состава, характеризуется низким содержанием сухого вещества: не более 8–10 %. Поэтому одной из основных технологий первичной переработки свиного навоза является разделение его на фракции [4–6]. Данная технология позволяет сократить объемы навозохранилищ и сроки последующей переработки твердой и жидкой фракций по отдельности. При этом появляется возможность применять более эффективные и экологически безопасные технологии переработки навоза и получения на его основе вторичных продуктов [7; 8].

Существующие на сегодняшний день методики расчета распределения биогенных элементов при разделении навоза на фракции ориентируются

на технологии содержания животных и технические средства, выходящие из обращения [9–11], или акцентируют внимание на конкретном элементе и распределяют остальные в порядке снижения приоритета [12–14]. Поэтому при расчете рекомендуемых доз внесения получаемого органического удобрения применяются усредненные значения содержания питательных веществ (азота, фосфора и калия)<sup>2</sup>.

Для объективного учета движения питательных веществ на уровне хозяйства необходима методика расчета распределения биогенных веществ при разделении навоза на твердую и жидкую фракции. Это важно для корректировки доз внесения полученного твердого и жидкого органического удобрения с учетом применяемых севооборотов, агрохимического анализа почв и конкретных культур для получения запланированного урожая.

Цель работы – разработка комплексной методики расчета распределения общего азота и фосфора между фракциями свиного навоза и ее апробация на материале пилотных свинокомплексов для подтверждения достоверности расчетов.

## Обзор литературы

В рамках комплексных исследований международными авторскими коллективами установлено, что в 1 т исходного свиного навоза влажностью 92 % в среднем содержится 6,4 кг азота, 4 кг фосфора и 3 кг калия [15; 16]. При этом на долю неорганических соединений приходится в среднем 75 % от общего содержания азота и до 87 % от общего содержания фосфора [17; 18]. Использование свиного навоза в качестве

<sup>1</sup> Федеральная служба государственной статистики : сайт. URL: <https://www.gks.ru/> (дата обращения: 21.01.2021).

<sup>2</sup> 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: сборник научных трудов международных 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.

органического удобрения положительно образом влияет на структуру и микробиологическое состояние почвы, а также на содержание в ней гумусовых веществ, что в конечном счете сказывается на ее плодородии [19; 20].

В наиболее развитых агропромышленных странах, традиционно специализирующихся на производстве свиноводческой продукции, все большее число предприятий внедряет технологии разделения навоза на фракции. Одним из лидеров в развитии свиноводства является Дания: при населении страны в 5,78 млн человек поголовье свиней насчитывает 12,64 млн голов<sup>3</sup>. Поэтому датские ученые занимают лидирующие позиции в разработке технологических решений переработки и учета свиного навоза. В своей работе М. Хьорт и коллеги рассматривают существующие технологии разделения навоза: седиментацию, применение ситовых или ленточных фильтров, механическое разделение при помощи декантерных центрифуг и шнековых сепараторов. Установлено, что в условиях интенсификации сельского хозяйства применение шнековых сепараторов позволяет, с учетом сравнительно невысоких капитальных вложений и эксплуатационных затрат, получить продукт с наибольшим содержанием сухого вещества (до 35 %) [21].

К похожему выводу пришли А. Макара и З. Ковальский. На базе 5 свиноводческих предприятий, расположенных в Польше, они смоделировали применение 3 вариантов технологии переработки образуемого навоза: хранение, длительное выдерживание и разделение на фракции с последующим производством специализированного органического удобрения. Для оценки эффективности рас-

смотренных вариантов был применен метод ВАННЕЕС, по которому 3-й вариант продемонстрировал существенно более высокую эффективность (89 %), чем хранение (22 %) и длительное выдерживание (39 %) [22].

Исследования Б. М. Али и коллег подтвердили, что более эффективное применение биогенных элементов, достигаемое за счет разделения исходного навоза на фракции, позволяет повысить коэффициент использования пахотных площадей под кормовые культуры и получить больше растениеводческой продукции с той же площади [23].

В целом европейские фермеры называют разделение свиного навоза на фракции одной из важных и применимых технологий при утилизации свиного навоза, так как она существенно расширяет возможность его переработки [24].

Китайские ученые уделяют значительное внимание вопросам экологической безопасности производства продукции свиноводства. Для оценки перспектив воздействия различных технологий переработки свиного навоза на окружающую среду созданы их модели для условий интенсивного сельского хозяйства Китая. Установлено, что технология разделения навоза на фракции и использование полученного органического удобрения оказывают существенно меньшую экологическую нагрузку, чем другие варианты, в частности технология длительного выдерживания [25].

Тенденция к разделению навоза на фракции, последующая раздельная переработка фракций и их применение в качестве органического удобрения более эффективно влияют на жизненный цикл локальной агробиосистемы, чем внесение неразделенного навоза

<sup>3</sup> Eurostat. Population. Total (persons). 2018 : сайт. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/RCI/#?vis=nuts1.population&lang=en> (дата обращения: 21.01.2021) ; Eurostat. Agriculture. Livestock farming, Live swine, domestic species. 2018 : сайт. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/RCI/#?vis=nuts2.agriculture&lang=en> (дата обращения: 21.01.2021).

или производство органоминеральных удобрений [26].

В России данная технология используется так же активно [27]. За последние годы доля свиноводческих предприятий, внедривших технологию разделения навоза на фракции, существенно выросла. В отдельных субъектах она превышает 85 % от общего числа свиноводческих комплексов [28–30].

В ходе многолетних исследований свиноводческих предприятий, расположенных в Европейской части России, установлено, что наибольшее распространение получила технология разделения навоза шнековыми сепараторами [31]. При этом более 90 % приходится на сепараторы фирм FAN, CRIMAN и Stallkamp (Германия и Литва) производительностью до 50 м<sup>3</sup>/ч, которые обеспечивают влажность твердой фракции до 68 и до 70 % перехода абсолютно сухого вещества из всей массы навоза в твердую фракцию [32–34].

При определении доз внесения твердого и жидкого органического удобрения расчет осуществляется в соответствии с заявленными характеристиками сепараторов. Однако применяемые рационы кормления животных и технологии навозоудаления влияют на распределение массы навоза и питательных элементов (общего азота и фосфора) между твердой и жидкой фракциями. Разработанная методика расчета распределения биогенных элементов при разделении навоза используется при подготовке технологических регламентов по обращению с навозом/пометом и помогает определять дозы внесения того или иного вида органических удобрений на поля с учетом содержания биогенных элементов в каждом виде органического удобрения. Более точное определение

вносимых доз позволяет снизить деградацию почв и обеспечить стабильность разнообразия биоценоза и повышение уровня экологической устойчивости локальной агробиосистемы [35].

### Материалы и методы

В рамках исследований были рассчитаны значения содержания питательных элементов в навозе, его твердой и жидкой фракциях на примере конкретных свиноводческих предприятий. Полученные данные сравнили с результатами лабораторных исследований физико-химического состава навоза и его фракций на рассматриваемых предприятиях.

В расчетах использовались следующие показатели:

- масса навоза  $M_M$ , его твердой  $M_{SF}$  и жидкой  $M_{LF}$  фракций;
- масса абсолютно сухого вещества в навозе  $M_{DM_M}$ , его твердой  $M_{DM_{SF}}$  и жидкой  $M_{DM_{LF}}$  фракциях;
- влажность навоза  $W_M$  и его твердой  $W_{SF}$  фракции;
- масса общего азота в твердой  $M_{N_{SF}}$  и жидкой  $M_{N_{LF}}$  фракциях;
- содержание общего азота в навозе  $N_M$ , его твердой  $N_{SF}$  и жидкой  $N_{LF}$  фракциях;
- масса общего фосфора в навозе, его твердой и жидкой фракциях;
- содержание общего фосфора в навозе, его твердой и жидкой фракциях.

Методика расчетов учитывает коэффициенты ( $K_2, K_4$ ) содержания питательных элементов в сухом веществе экскрементов свиней, взятые из нормативных документов, и коэффициенты ( $K_1, K_3, K_5$ ), полученные экспериментальным путем исследователями Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП)<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> РД-АПК 1.10.15.02-17. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета. М. : Росинформагротех, 2020. 187 с. ; РД-АПК 3.10.15.01-17. Методические рекомендации по проектированию систем удаления, обработки, обеззараживания, хранения и утилизации навоза и помета. М. : Росинформагротех, 2017. 154 с.

Масса абсолютно сухого вещества в экскрементах животных (т/сут) определена по формуле (1):

$$M_{DM\_E} = M_E \cdot \frac{100 - W_E}{100}, \quad (1)$$

где  $M_E$  – масса экскрементов животных, т/сут;  $W_E$  – влажность экскрементов животных, %.

Масса абсолютно сухого вещества в подаваемом на сепаратор навозе (т/сут) определена по формуле (2):

$$M_{DM\_M} = M_M \cdot \frac{100 - W_M}{100}, \quad (2)$$

где  $M_M$  – масса навоза животных, т/сут;  $W_M$  – влажность навоза животных, %.

Масса абсолютно сухого вещества, переходящего из навоза в твердую фракцию после сепарации (т/сут), определена по формуле (3):

$$M_{DM\_SF} = K_1 \cdot M_{DM\_M}. \quad (3)$$

где  $K_1$  – доля абсолютно сухого вещества, переходящего из всей массы навоза в твердую фракцию.

Масса абсолютно сухого вещества, переходящего из навоза в жидкую фракцию после сепарации (т/сут), определена по формуле (4):

$$M_{DM\_LF} = M_{DM\_M} - M_{DM\_SF}. \quad (4)$$

Масса твердой фракции навоза после сепарации (т/сут) определена по формуле (5):

$$M_{SF} = \frac{M_{DM\_SF} \cdot 100}{100 - W_{SF}}, \quad (5)$$

где  $W_{SF}$  – влажность твердой фракции навоза, %.

Масса жидкой фракции навоза (т/сут) определена по формуле (6):

$$M_{LF} = M_M - M_{SF}. \quad (6)$$

Масса общего азота в экскрементах животных (т/сут) определена по формуле (7):

$$M_{N\_E} = M_{DM\_E} \cdot \frac{K_2}{100}, \quad (7)$$

где  $K_2$  – процентное содержание общего азота в экскрементах животных (в пересчете на абсолютно сухое вещество).

Содержание общего азота в навозе (мг/кг) определено по формуле (8):

$$N_M = \frac{M_{N\_E} \cdot 1\,000\,000}{M_M}. \quad (8)$$

Масса общего азота в твердой фракции навоза (т/сут) определена по формуле (9):

$$M_{N\_SF} = M_{SF} \cdot \frac{K_3}{100}, \quad (9)$$

где  $K_3$  – процентное содержание общего азота в твердой фракции навоза<sup>5</sup>.

Содержание общего азота в твердой фракции навоза (мг/кг) определено по формуле (10):

$$N_{SF} = \frac{M_{N\_SF} \cdot 1\,000\,000}{M_{SF}}. \quad (10)$$

Масса общего азота в жидкой фракции навоза (т/сут) определена по формуле (11):

$$M_{N\_LF} = M_{N\_M} - M_{N\_SF}. \quad (11)$$

<sup>5</sup> Шалавина Е. В. Повышение эффективности переработки свиного навоза путем оптимизации технологических процессов и формирования адаптивных технологий : дис. ... канд. тех. наук. СПб., 2015. 152 с.

Содержание общего азота в жидкой фракции навоза (мг/кг) определено по формуле (12):

$$N_{LF} = \frac{M_{N-LF} \cdot 1\,000\,000}{M_{LF}}. \quad (12)$$

Для расчета массы общего фосфора в навозе, твердой фракции навоза, жидкой фракции навоза, а также содержания общего фосфора в навозе, в твердой и жидкой фракциях использованы формулы (7)–(12), но уже с соответствующими коэффициентами по фосфору:  $K_4$  – процентное содержание общего фосфора в экскрементах животных (в пересчете на абсолютно сухое вещество);  $K_5$  – процентное содержание общего фосфора в твердой фракции навоза.

Масса общего фосфора в экскрементах животных (т/сут) определена по формуле (13):

$$M_{P-E} = M_{DM-E} \cdot \frac{K_4}{100}. \quad (13)$$

Содержание общего фосфора в навозе (мг/кг) определено по формуле (14):

$$P_M = \frac{M_{P-E} \cdot 1\,000\,000}{M_M}. \quad (14)$$

Масса общего фосфора в твердой фракции навоза (т/сут) определена по формуле (15)<sup>6</sup>:

$$M_{P-SF} = M_{SF} \cdot \frac{K_5}{100}. \quad (15)$$

Содержание общего фосфора в твердой фракции навоза (мг/кг) определено по формуле (16):

$$P_{SF} = \frac{M_{P-SF} \cdot 1\,000\,000}{M_{SF}}. \quad (16)$$

Масса общего фосфора в жидкой фракции навоза (т/сут) определена по формуле (17):

$$M_{P-LF} = M_{P-M} - M_{P-SF}. \quad (17)$$

Содержание общего фосфора в жидкой фракции навоза (мг/кг) определено по формуле (18):

$$P_{LF} = \frac{M_{P-LF} \cdot 1\,000\,000}{M_{LF}}. \quad (18)$$

Экспериментальные исследования выполнены в лаборатории биоконверсии органических отходов, анализы проб – в аналитической лаборатории ИАЭП в 2020 году. В качестве исходного материала был выбран свиной навоз, а также его жидкая и твердая фракции, отобранные на двух свиноводческих комплексах, расположенных в Ленинградской области. Пробы отбирались с трехкратной повторностью.

Первый из рассматриваемых пилотных свиноводческих комплексов – это предприятие замкнутого цикла со среднегодовым поголовьем 108 тыс. голов, в том числе поросят-сосунов. Весь период откорма животные содержатся в групповых станках. Подстилочный материал (опилки) используется только в отделениях для опороса и содержания поросят до двухмесячного возраста. Удаление навоза и транспортирование его за пределы животноводческих помещений осуществляется гидравлическим способом (гидросмыв). Участок разделения навоза оснащен шнековым сепаратором.

Второй пилотный комплекс – это предприятие замкнутого цикла со среднегодовым поголовьем 20 тыс. голов. Технология содержания – групповые станки. Навоз удаляется при помощи самосплавной системы периодического

<sup>6</sup> Там же.

действия. Участок разделения навоза оснащен шнековым сепаратором (SM 260/0,75).

Определение физико-химических свойств перерабатываемого материала выполнялось при соблюдении соответствующих ГОСТов<sup>7</sup>. Отбор проб осуществлялся с соблюдением ГОСТа 58487-2019<sup>8</sup>. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась в программе StatGraphics Centurion v.16.

Для проверки действенности разработанной методики по материалам зарубежных исследований был выбран свиноводческий комплекс в Дании со схожей системой содержания животных и обращения с навозом. Исходные данные по химическому составу навоза на комплексе были взяты из литературного источника, расчеты проведены по разработанной методике, результаты расчетов сопоставлены с данными из литературного источника.

### Результаты исследования

Количественные и качественные характеристики свиного навоза, а также его фракций, полученные расчетным методом в соответствии с разработанной методикой, представлены в таблице 1.

Разница в количестве образуемого навоза и его фракций пропорциональна количеству одновременно содержащихся животных.

На двух пилотных свинокомплексах проводился отбор и анализ проб исходного свиного навоза, твердой фракции навоза и жидкой фракции навоза. Пробы отбирались с трехкратной повторностью. Сравнение расчетных и средних фактических значений содержания

биогенных элементов в свином навозе и его фракциях представлено в таблице 2.

Результаты сравнения расчетных и средних фактических (из протоколов лабораторных анализов) значений продемонстрировали, что по всем показателям различия не превышают 10 %.

Апробация методики показала, что

– различия между расчетными и средними фактическими значениями по содержанию общего азота в свином навозе составляют от 2,9 до 9,1 %; по содержанию общего фосфора – от 4,6 до 9,0 %;

– различия между расчетными и средними фактическими значениями по содержанию общего азота в твердой фракции свиного навоза составляют от 1,9 до 9,8 %, по содержанию общего фосфора – от 4,8 до 5,2 %;

– различия между расчетными и средними фактическими значениями по содержанию общего азота в жидкой фракции навоза составляют от 9,1 до 10,0 %; по содержанию общего фосфора – от 5,7 до 6,7 %.

По разработанной методике выполнен расчет для иностранного свиноводческого комплекса. В качестве исследуемого предприятия выбран датский откормочный свиноводческий комплекс (откорм поросят от 31 до 108 кг), технология навозоудаления самосплавная (решетчатый пол). Весь образуемый свиной навоз на предприятии подается в цех разделения на твердую и жидкую фракции с помощью сепаратора винтового типа. Характеристики свиного навоза (на основании данных из статьи) представлены в таблице 3 [6].

<sup>7</sup> ГОСТ 26713-85. Удобрения органические. Метод определения влаги и сухого остатка. М. : Издательство стандартов, 1986 ; ГОСТ 26715-85. Удобрения органические. Методы определения общего азота. М. : Издательство стандартов, 1986 ; ГОСТ 26717-85. Удобрения органические. Метод определения общего фосфора. М. : Издательство стандартов, 1986.

<sup>8</sup> ГОСТ Р 58487-2019. Удобрения органические. Методы отбора проб. М. : Стандартинформ, 2019.



**Количественные и качественные характеристики свиного навоза и его фракций, полученные расчетным методом**

**Calculated quantity and quality of pig manure and its fractions**

Показатель / Indicator	Пилотное предприятие 1 / Pilot pig complex 1	Пилотное предприятие 2 / Pilot pig complex 2
Свиной навоз / Pig manure		
Масса навоза, т/сут / Mass of manure, t/day	424,70	150,00
Масса абсолютно сухого вещества, т/сут / Mass of oven-dry substance, t/day	14,90	8,50
Влажность навоза, % / Manure moisture content, %	96,50	91,50
Масса общего азота, т/сут / Mass of total nitrogen, t/day	0,94	0,51
Масса общего фосфора, т/сут / Mass of total phosphorus, t/day	0,21	0,15
Содержание общего азота в навозе, % / Manure total nitrogen content, %	0,22	0,34
Содержание общего фосфора в навозе, % / Manure total phosphorus content, %	0,05	0,10
Твердая фракция навоза / Solid fraction of pig manure		
Масса твердой фракции, т/сут / Mass of solid fraction, t/day	24,31	21,00
Масса абсолютно сухого вещества, т/сут / Mass of oven-dry substance, t/day	10,43	5,95
Влажность, % / Moisture content, %	57,10	71,60
Масса общего азота, т/сут / Mass of total nitrogen, t/day	0,11	0,11
Масса общего фосфора, т/сут / Mass of total phosphorus, t/day	0,05	0,06
Содержание общего азота в твердой фракции, % / Total nitrogen content in solid fraction, %	0,45	0,52
Содержание общего фосфора в твердой фракции, % / Total phosphorus content in solid fraction, %	0,21	0,29
Жидкая фракция навоза / Liquid fraction of pig manure		
Масса жидкой фракции, т/сут / Mass of liquid fraction, t/day	400,39	129,00
Масса абсолютно сухого вещества, т/сут / Mass of oven-dry substance, t/day	4,47	2,55
Влажность, % / Moisture content, %	99,00	98,00
Масса общего азота, т/сут / Mass of total nitrogen, t/day	0,82	0,28
Масса общего фосфора, т/сут / Mass of total phosphorus, t/day	0,14	0,09
Содержание общего азота в жидкой фракции, % / Total nitrogen content in liquid fraction, %	0,20	0,22
Содержание общего фосфора в жидкой фракции, % / Total phosphorus content in liquid fraction	0,03	0,07

Таблица 2  
Table 2

Расчетные и средние фактические значения содержания биогенных элементов в свином навозе и его фракциях  
Calculated and average actual values of nutrients content in pig manure and its fractions

Показатель / Indicator	Пилотное предприятие 1 / Pilot pig complex 1		Пилотное предприятие 2 / Pilot pig complex 2		Различие, % / Difference, %
	Расчетные, мг/кг / Calculated values, mg/kg	Фактические, мг/кг / Actual values, mg/kg	Расчетные, мг/кг / Calculated values, mg/kg	Фактические, мг/кг / Actual values, mg/kg	
Содержание общего азота в навозе / Total nitrogen content in pig manure	2 200	2 400 $\bar{x} + \sigma = 2 416;$ $\bar{x} - \sigma = 2 384$ 477	3 400	3 500 $\bar{x} + \sigma = 3 524;$ $\bar{x} - \sigma = 3 476$ 1 090	2,9
	500	$\bar{x} + \sigma = 486;$ $\bar{x} - \sigma = 468$	1 000	$\bar{x} + \sigma = 1 111;$ $\bar{x} - \sigma = 1 069$ 5 300	9,0
Содержание общего азота в твердой фракции / Total nitrogen content in solid fraction	4 500	4 060 $\bar{x} + \sigma = 4 087;$ $\bar{x} - \sigma = 4 033$	5 200	5 331; 5 269	1,9
	2 100	2 000 $\bar{x} + \sigma = 2 044;$ $\bar{x} - \sigma = 1 956$	2 900	2 750 $\bar{x} + \sigma = 2 801;$ $\bar{x} - \sigma = 2 699$	5,2
Содержание общего азота в жидкой фракции / Total nitrogen content in liquid fraction	2 000	2 200 $\bar{x} + \sigma = 2 243;$ $\bar{x} - \sigma = 2 157$	2 200	2 400 $\bar{x} + \sigma = 2 439;$ $\bar{x} - \sigma = 2 361$	9,1
	235,8	220 $\bar{x} + \sigma = 229;$ $\bar{x} - \sigma = 211$	700	740 $\bar{x} + \sigma = 752;$ $\bar{x} - \sigma = 728$	5,7

Примечание / Note.  $\bar{x}$  – среднее значение;  $\sigma$  – диапазон вариации, стандартное отклонение /  $\bar{x}$  – the mean value;  $\sigma$  – the square from variance, standart deviation

Т а б л и ц а 3  
T a b l e 3

**Фактические характеристики свиного навоза датского свиноводческого комплекса**  
**Actual characteristics of pig manure from a Danish pig rearing complex**

Показатель / Indicator	Значение / Value
Влажность навоза, % / Manure moisture content, %	90,90
Содержание общего азота в навозе, % / Total nitrogen content in manure, %	0,65
Содержание общего фосфора в навозе, % / Total phosphorus content in manure, %	0,19

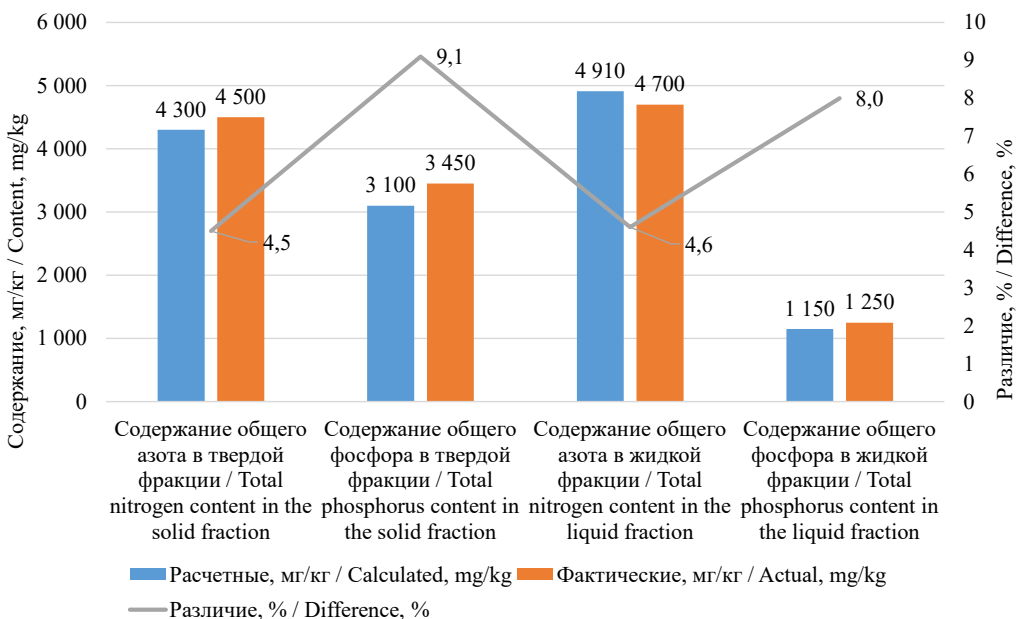
Сравнение расчетных (в соответствии с представленной выше методикой) и фактических значений (на основании данных из статьи) содержания биогенных элементов во фракциях представлено на рисунке. Исходный навоз содержит общего азота 6 500 мг/кг и общего фосфора 1 900 мг/кг.

Как видно из таблицы 2 и рисунка, отличия между расчетными и средними фактическими данными составляют

не более 10 %. Данные отличия можно объяснить допустимой погрешностью приборов и неравномерностью исходного сырья (смесь экскрементов с технологической водой).

**Обсуждение и заключение**

На основании проведенного обзора технологий обращения со свиным навозом в России и за рубежом определены наиболее релевантные способы расчета содержания питательных веществ



Р и с. Расчетные и фактические значения содержания общего азота и фосфора в твердой и жидкой фракциях навоза (датский свиноводческий комплекс)

F i g. Calculated and actual values of total nitrogen and total phosphorus content in solid and liquid fractions of pig manure (Danish pig rearing complex)

в нативном навозе и его фракциях. Предложенный метод определения физических и химических показателей свиного навоза до и после сепарации совмещает преимущества рассмотренных способов, обеспечивая при этом более высокое схождение расчетных и фактических значений.

По разработанной методике рассчитано содержание общего азота и общего фосфора в твердой и жидкой фракциях свиного навоза на материале двух типовых свиноводческих комплексов законченного цикла, расположенных в Ленинградской области. Для подтверждения корректности методики проведены экспериментальные исследования на этих же комплексах.

Апробация методики показала, что различия между расчетными и средними фактическими значениями по содержанию общего азота в свином навозе составляют от 2,9 до 9,1 %, по содержанию общего фосфора – от 4,6 до 9,0 %. Различия по содержанию общего азота в твердой фракции свиного навоза составляют от 1,9 до 9,8 %, по содержанию общего фосфора – от 4,8 до 5,2 %. Различия по содержанию общего азота в жидкой фракции навоза составляют от 9,1 до 10,0 %, по содержанию общего фосфора – от 5,7 до 6,7 %. Полученные различия можно объяснить допустимой погрешностью приборов и неоднородностью исходного сырья – смеси экскрементов с технологической водой.

Кроме того, был выполнен расчет по исходным данным зарубежного свиноводческого комплекса (Дания), взятым из открытого литературного источника. Полученные результаты были сопоставимы с указанными в источнике значениями.

Результаты исследования подтвердили достоверность разработанного метода для учета питательных веществ в получаемых твердых и жидких органических удобрениях при расчете и корректировке доз их внесения под определенные культуры для получения заданного урожая и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Полученная методика расчета распределения азота и фосфора между фракциями свиного навоза может применяться при проектировании систем переработки и использования навоза в качестве органического удобрения при производстве растениеводческой продукции. Возможность прогнозирования содержания питательных элементов в твердой и жидкой фракциях навоза позволяет выбирать наиболее подходящие технологии переработки, обеспечивающие минимальную эмиссию биогенных элементов в окружающую среду, а также более точно рассчитывать дозы внесения полученных органических удобрений, тем самым качественно повышая характеристики почв.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

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. Вып. 90. С. 5–14. URL: <https://clck.ru/bNGaV> (дата обращения: 21.01.2021).
2. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Logistic Transport Model of Region-Scale Distribution of Organic Fertilizers // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (23–25 May 2018). Jelgava, 2018. P. 270–277. doi: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N301>
3. Velthof G. L., Rietra R. P. J. J. Nitrogen Use Efficiency and Gaseous Nitrogen Losses from the Concentrated Liquid Fraction of Pig Slurries [Электронный ресурс] // International Journal of Agronomy. 2019. doi: <https://doi.org/10.1155/2019/9283106>

4. Трифанов А. В., Базыкин В. И. Обоснование оптимальной относительной влажности свиного навоза при применении самотечной системы удаления навоза периодического действия // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. Вып. 96. С. 250–257. doi: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10080>
5. Kariyama I. D., Zhai X., Wu B. Physical and Rheological Properties of Animal Manure: A Review // Transactions of the ASABE. 2018. Vol. 61, Issue 3. P. 1113–1120. doi: <https://doi.org/10.13031/trans.12768>
6. Effect of Acidification on Solid–Liquid Separation of Pig Slurry / G. Coccolo [et al.] // Biosystems Engineering. 2016. Vol. 143. P. 20–27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.004>
7. 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.028>
8. Уваров Р. А. Анализ технологий переработки твердого навоза и помета, адаптированных к условиям Северо-Западного Федерального округа // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. Вып. 93. С. 133–146. URL: <https://clck.ru/bNGqh> (дата обращения: 13.02.2021).
9. Zhang R. H., Westerman P. W. Solid-Liquid Separation of Annual Manure for Odor Control and Nutrient Management // Applied Engineering in Agriculture. 1997. Vol. 13. Issue 3. P. 385–393. doi: <https://doi.org/10.13031/2013.21614>
10. Effect of the Pig Slurry Separation Techniques on the Characteristics and Potential Availability of N to Plants in the Resulting Liquid and Solid Fractions / D. Fangueiro [et al.] // Biosystems Engineering. 2012. Vol. 113, Issue 2. P. 187–194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.07.006>
11. Bachmann S., Uptmoor R., Eichler-Löbermann B. Phosphorus Distribution and Availability in Untreated and Mechanically Separated Biogas Digestates // Scientia Agricola. 2016. Vol. 73, Issue 1. P. 9–17. doi: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0069>
12. Gomez-Munoz B., Case S. D. C., Jensen L. S. Pig Slurry Acidification and Separation Techniques Affect Soil N and C Turnover and N<sub>2</sub>O Emissions from Solid, Liquid and Biochar Fractions // Journal of Environmental Management. 2016. Vol. 168. P. 236–244. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.018>
13. Revision of the Simplified Balance Method to Evaluate Phosphorus Excretion by Growing-Finishing Pigs / M. P. L. Montminy [et al.] // Journal of Animal Science. 2017. Vol. 95, Issue 2. P. 130–131. doi: <https://doi.org/10.2527/asasmw.2017.271>
14. Nutrient Variations from Swine Manure to Agricultural Land / S. Won [et al.] // Asian-Australasian Journal of Animal Sciences. 2018. Vol. 31, Issue 5. P. 763–772. doi: <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0634>
15. Characterization of Compost Produced from Separated Pig Manure and a Variety of Bulking Agents at Low Initial C/N Ratios / T. Nolan [et al.] // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102, Issue 14. P. 7131–7138. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.066>
16. Effect of Sawdust Addition on Composting of Separated Raw and Anaerobically Digested Pig Manure / S. M. Troy [et al.] // Journal of Environmental Management. 2012. Vol. 111. P. 70–77. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.035>
17. Comparative Study of Different Organic Manures and NPK Fertilizer for Improvement of Soil Chemical Properties and Dry Matter Yield of Maize in Two Different Soils / O. N. Adeniyani [et al.] // Journal of Soil Science and Environmental Management. 2011. Vol. 2, Issue 1. P. 9–13. URL: <https://academicjournals.org/journal/JSSEM/article-full-text-pdf/0573C6210248.pdf> (дата обращения: 10.03.2021).
18. Kowalski Z., Makara A., Fijorek K. Changes in the Properties of Pig Manure Slurry // Acta Biochimica Polonica. 2013. Vol. 60, Issue 4. P. 845–850. doi: [https://doi.org/10.18388/abp.2013\\_2070](https://doi.org/10.18388/abp.2013_2070)
19. On-Farm Evaluation of Liquid Swine Manure as a Nitrogen Source for Corn Production / K. P. Woli [et al.] // Agronomy Journal. 2013. Vol. 105, Issue 1. P. 248–262. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0292>
20. Pig Slurry and Mineral Fertilization Strategies' Effects on Soil Quality: Macroaggregate Stability and Organic Matter Fractions / M. R. Yagüe [et al.] // Science of the Total Environment. 2012. Vol. 438. P. 218–224. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.063>
21. Solid-Liquid Separation of Animal Slurry in Theory and Practice. A Review / M. Hjorth [et al.] // Agronomy for Sustainable Development. 2010. Vol. 30, Issue 1. P. 153–180. doi: <https://doi.org/10.1051/agro/2009010>
22. Makara A., Kowalski Z. Selection of Pig Manure Management Strategies: Case Study of Polish Farms // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 172. P. 187–195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.095>

23. Environmental and Economic Impacts of Using Co-Products in the Diets of Finishing Pigs in Brazil / B. M. Ali [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 162. P. 247–259. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.041>
24. Stakeholder Perceptions of Manure Treatment Technologies in Denmark, Italy, the Netherlands and Spain / Y. Hou [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 172. P. 1620–1630. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.162>
25. Evaluating Environmental Impacts of Pig Slurry Treatment Technologies with a Life-Cycle Perspective / Z. Yuan [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 188. P. 840–850. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.021>
26. Comparative Analyses of Pig Farming Management Systems Using the Life Cycle Assessment Method [Электронный ресурс] / A. Makara [et al.] // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 241. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118305>
27. Михайлова О. А. Тенденции развития мирового свиноводства // Вестник аграрной науки. 2018. № 1. С. 36–45. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendentsii-razvitiya-mirovogo-svinovodstva> (дата обращения: 26.03.2021).
28. Чистяков Г. В., Жиликов Д. И. Анализ отрасли свиноводства в рамках реализации государственных программ развития // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 5. С. 73–77. URL: <https://clck.ru/bNHTM> (дата обращения: 27.03.2021).
29. Методы решения экологических проблем в животноводстве и птицеводстве / А. Ю. Брюханов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 4. С. 32–37. doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-4-32-37>
30. Койнова А. Н. Инновационные решения для свиноккомплексов // Эффективное животноводство. 2019. № 8. С. 68–77. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-resheniya-dlya-svinokompleksov> (дата обращения: 28.03.2021).
31. Ковалев Н. Г., Гриднев П. И., Гриднева Т. Т. Научное обеспечение развития экологически безопасных систем утилизации навоза // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 1. С. 62–69. URL: <https://clck.ru/bNHUt> (дата обращения: 31.03.2021).
32. Базыкин В. И., Трифанов А. В. Алгоритм управления системой удаления навоза на свиноводческих предприятиях // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 4. С. 34–40. URL: <https://clck.ru/bNHVR> (дата обращения: 01.04.2021).
33. Forming of Environmentally Friendly Technologies of Pig Manure Utilization / E. Shalavina [et al.] // Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (24–26 May 2017). Jelgava, 2017. P. 333–341. doi: <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N065>
34. Гриднев П. И., Гриднева Т. Т. Потери азота при различных технологиях хранения и подготовки навоза к использованию // Вестник ВНИИМЖ. 2018. № 4. С. 111–120. URL: <https://clck.ru/bNHZ8> (дата обращения: 03.04.2021).
35. Показатели негативного воздействия на окружающую среду при производстве сельскохозяйственной продукции / А. Ю. Брюханов [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 2. С. 250–260. URL: <https://clck.ru/bNHZm> (дата обращения: 05.04.2021).

*Поступила 20.10.2021; одобрена после рецензирования 19.11.2021; принята к публикации 15.12.2021*

*Об авторах:*

**Шалавина Екатерина Викторовна**, старший научный сотрудник отдела инженерной экологии сельскохозяйственного производства Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, Researcher ID: C-1980-2018, shalavinaev@mail.ru

**Уваров Роман Алексеевич**, научный сотрудник отдела инженерной экологии сельскохозяйственного производства Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2792-0136>, Researcher ID: L-3047-2016, rauvarov@yandex.ru

**Васильев Эдуард Вадимович**, ведущий научный сотрудник отдела инженерной экологии сельскохозяйственного производства Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства – филиала Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (196625, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Филътровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, Researcher ID: C-1304-2018, sznii6@yandex.ru

*Заявленный вклад авторов:*

Е. В. Шалавина – разработка методики, проведение расчетов, отбор проб, сравнение результатов, проведение лабораторных анализов.

Р. А. Уваров – формирование структуры статьи, литературный обзор.

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

*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* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2016; 90:5-14. Available at: <https://clck.ru/bNGaV> (accessed 21.01.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
2. Uvarov R., Briukhanov A., Shalavina E. Logistic Transport Model of Region-Scale Distribution of Organic Fertilizers. In: Proceedings of International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (23-25 May 2018). Jelgava; 2018. p. 270-277. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N301>
3. Velthof G.L., Rietra R.P.J.J. Nitrogen Use Efficiency and Gaseous Nitrogen Losses from the Concentrated Liquid Fraction of Pig Slurries. *International Journal of Agronomy*. 2019. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1155/2019/9283106>
4. Trifanov A.V., Bazykin V.I. Substantiation of Optimum Relative Moisture Content of Slurry When Applying the Batch-Type Gravity Flow System for Its Removal. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2018; 96:250-257. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10080>
5. 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. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.13031/trans.12768>
6. Cocolo G., Hjorth M., Zarebska A., Provolo G. Effect of Acidification on Solid-Liquid Separation of Pig Slurry. *Biosystems Engineering*. 2016; 143:20-27. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.004>
7. 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. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.028>
8. Uvarov R.A. Survey of Solid Animal and Poultry Manure Processing Technologies Adapted to the North-West Federal District Conditions. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products. 2017; 93:133-146. Available at: <https://clck.ru/bNGqH> (accessed 13.02.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
9. Zhang R.H., Westerman P.W. Solid-Liquid Separation of Annual Manure for Odor Control and Nutrient Management. *Applied Engineering in Agriculture*. 1997; 13(3):385-393. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.13031/2013.21614>
10. Fangueiro D., Lopes C., Surgu S., Vasconcelos E. Effect of the Pig Slurry Separation Techniques on the Characteristics and Potential Availability of N to Plants in the Resulting Liquid and Solid Fractions. *Biosystems Engineering*. 2012; 113(2):187-194. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.07.006>
11. Bachmann S., Uptmoor R., Eichler-Löbermann B. Phosphorus Distribution and Availability in Untreated and Mechanically Separated Biogas Digestates. *Scientia Agricola*. 2016; 73(1):9-17. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0069>

12. Gomez-Munoz B., Case S.D.C., Jensen L.S. Pig Slurry Acidification and Separation Techniques Affect Soil N and C Turnover and N<sub>2</sub>O Emissions from Solid, Liquid and Biochar Fractions. *Journal of Environmental Management*. 2016; 168:236-244. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.018>
13. Montminy M.P.L., Cloutier L., Couture C., et al. Revision of the Simplified Balance Method to Evaluate Phosphorus Excretion by Growing-Finishing Pigs. *Journal of Animal Science*. 2017; 95(2):130-131. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.2527/asasmw.2017.271>
14. Won S., You B.-G., Shim S., et al. Nutrient Variations from Swine Manure to Agricultural Land. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2018; 31(5):763-772. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0634>
15. Nolan T., Troy S.M., Healy M.G., et al. Characterization of Compost Produced from Separated Pig Manure and a Variety of Bulking Agents at Low Initial C/N Ratios. *Bioresource Technology*. 2011; 102(14):7131-7138. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.04.066>
16. Troy S.M., Nolan T., Kwapinski W., et al. Effect of Sawdust Addition on Composting of Separated Raw and Anaerobically Digested Pig Manure. *Journal of Environmental Management*. 2012; 111:70-77. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.035>
17. Adeniyani O.N., Ojo A.O., Akinbode O.A., Adediran J.A. Comparative Study of Different Organic Manures and NPK Fertilizer for Improvement of Soil Chemical Properties and Dry Matter Yield of Maize in Two Different Soils. *Journal of Soil Science and Environmental Management*. 2011; 2(1):9-13. Available at: <https://academicjournals.org/journal/JSSEM/article-full-text-pdf/0573C6210248.pdf> (accessed 10.03.2021). (In Eng.)
18. Kowalski Z., Makara A., Fijorek K. Changes in the Properties of Pig Manure Slurry. *Acta Biochimica Polonica*. 2013; 60(4):845-850. (In Eng.) doi: [https://doi.org/10.18388/abp.2013\\_2070](https://doi.org/10.18388/abp.2013_2070)
19. Woli K.P., Rakshit S., Lundvall J.P., et al. On-Farm Evaluation of Liquid Swine Manure as a Nitrogen Source for Corn Production. *Agronomy Journal*. 2013; 105(1):248-262. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.2134/agronj2012.0292>
20. Yagüe M.R., Bosch-Serra A.D., Antúnez M., Boixadera J. Pig Slurry and Mineral Fertilization Strategies' Effects on Soil Quality: Macroaggregate Stability and Organic Matter Fractions. *Science of the Total Environment*. 2012; 438:218-224. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.063>
21. Hjørth M., Christensen K.V., Christensen M.L., Sommer S.G. Solid-Liquid Separation of Animal Slurry in Theory and Practice. A Review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2010; 30(1):153-180. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1051/agro/2009010>
22. Makara A., Kowalski Z. Selection of Pig Manure Management Strategies: Case Study of Polish Farms. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 172:187-195. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.095>
23. Ali B.M., van Zanten H.H.E., Berentsen P., et al. Environmental and Economic Impacts of Using Co-Products in the Diets of Finishing Pigs in Brazil. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 162:247-259. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.041>
24. Hou Y., Velthof G.L., Case S.D.C., et al. Stakeholder Perceptions of Manure Treatment Technologies in Denmark, Italy, the Netherlands and Spain. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 172:1620-1630. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.162>
25. Yuan Z., Pan X., Chen T., et al. Evaluating Environmental Impacts of Pig Slurry Treatment Technologies with a Life-Cycle Perspective. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 188:840-850. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.021>
26. Makara A., Kowalski Z., Lelek L., Kulczycka J. Comparative Analyses of Pig Farming Management Systems Using the Life Cycle Assessment Method. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 241. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.11.8305>
27. Mikhailova O.A. Tendencies of the World Swine Breeding Development. *Vestnik agrarnoy nauki* = Bulletin of Agrarian Science. 2018; (1):36-45. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tendent-sii-razvitiya-mirovogo-svinovodstva> (accessed 26.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
28. Chistyakov G.V., Zhilyakov D.I. Analysis of the Pig Industry in the Framework of the State Programs of Development. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2017; (5):73-77. Available at: <https://clck.ru/bNHTM> (accessed 27.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
29. Bryukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Uvarov R.A. Methods for Solving Environmental Problems in Livestock and Poultry Farming. *Selskokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii* = Processes and machines of agroengineering systems



Agricultural Machinery and Technologies. 2019; 13(4):32-37. (In Russ., abstract in Eng.) doi: <https://doi.org/10.22314/2073-7599-2019-13-4-32-37>

30. Koynova A.N. [Innovative Solutions for Pig Farms]. *Effektivnoe zhivotnovodstvo = Effective Livestock Production*. 2019; (8):68-77. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/innovatsionnye-resheniya-dlya-svinokompleksov> (accessed 28.03.2021). (In Russ.)

31. Kovalev N.G., Gridnev P.I., Gridneva T.T. Scientific Support for the Development of Environmentally Safed Systems of Manure Utilization. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*. 2016; (1):62-69. Available at: <https://clck.ru/bNHUt> (accessed 31.03.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

32. Bazykin V.I., Trifanov A.V. [Manure Removal System Management Algorithm for Pig Farms]. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii = Proceedings of the Velikolukskaya State Agricultural Academy*. 2017; (4):34-40. Available at: <https://clck.ru/bNHVR> (accessed 01.04.2021). (In Russ.)

33. Shalavina E., Briukhanov A., Uvarov R., Vasilev E. Forming of Environmentally Friendly Technologies of Pig Manure Utilization. In: Proceedings of International Scientific Conference "Engineering for Rural Development" (24-26 May 2017). Jelgava; 2017. p. 333-341. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N065>

34. Gridnev P.I., Gridneva T.T. The Loss of Nitrogen at Various Technologies of Manure Storage and Preparation For Using. *Vestnik VNIIMZh = Bulletin of the Russian Research Institute for Mechanization of Animal Husbandry*. 2018; (4):111-120. Available at: <https://clck.ru/bNHZ8> (accessed 03.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

35. Briukhanov A.Yu., Vasilev E.V., Shalavina E.V., Oblomkova N.S. Indicators of Negative Environmental Impact in Agri-Food Production. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop and Livestock Products*. 2019; (2):250-260. Available at: <https://clck.ru/bNHZm> (accessed 05.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

*Submitted 20.10.2021; approved after reviewing 19.11.2021; accepted for publication 15.12.2021*

*About the authors:*

**Ekaterina V. Shalavina**, Leading Researcher at the Department of Engineering Ecology of Agricultural Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7345-1510>, Researcher ID: C-1980-2018, shalavinaev@mail.ru

**Roman A. Uvarov**, Researcher at the Department of Engineering Ecology of Agricultural Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2792-0136>, Researcher ID: L-3047-2016, rauvarov@yandex.ru

**Eduard V. Vasilev**, Senior Researcher at the Department of Engineering Ecology of Agricultural Production, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Saint Petersburg 196625, Russian Federation), Cand.Sci. (Engr.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5910-5793>, Researcher ID: C-1304-2018, sznii6@yandex.ru

*Contribution of the authors:*

E. V. Shalavina – development of methodology, calculations, sampling, comparison of results, laboratory analyses.

R. A. Uvarov – development of the structure of the article, literary review.

E. V. Vasilev – problem statement, development of methodology.

*All authors have read and approved the final manuscript.*