



Концептуальная модель энергетической эффективности получения экологически безопасного утилизационного свиного бесподстилочного навоза

Н. В. Бышов¹, И. А. Успенский^{1*}, И. А. Юхин¹,
М. Н. Чаткин², Н. В. Лимаренко³

¹ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (г. Рязань, Россия)

²ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

³ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Россия)

*ivan.uspenskiy@yandex.ru

Введение. Рост производственных мощностей животноводческих предприятий приводит к увеличению экологической нагрузки на био- и агроценозы, создаваемой потенциальными энергоносителями, одним из которых является свиной бесподстилочный навоз. Параметрами, характеризующими энергетическую ценность, являются: общее содержание азота и его различных форм 3...8 кг/м³, оксида фосфора 3...6 кг/м³, оксида калия 2...4 кг/м³ (химическое потребление кислорода к массе органического вещества – 1,2, биохимическое – 0,42). Параллельно с этим экологическую нагрузку составляют группы кишечных палочек, стафилококков, энтерококков, аэробных спорообразующих микроорганизмов, различных форм яиц, цист простейших и ооцист эймерий. Кроме этого, физико-реологические свойства бесподстилочного навоза могут оказывать существенное влияние на энергетическую эффективность и направление дальнейшей его утилизации. Наиболее рациональным вариантом его утилизации с агрохимической точки зрения является фракционное использование в виде органического удобрения, что возможно только при условии санитарно-эпидемиологической безопасности, обеспечение которой является энергоёмким процессом, зависящим от различных факторов. Целью настоящего исследования является разработка концептуальной модели энергетической эффективности операционных воздействий при получении экологически безопасного утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза.

Материалы и методы. Объектом исследования являются операционные воздействия при получении экологически безопасного утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза; предметом – функция максимизации энергетической эффективности данного объекта в условиях санитарно-эпидемиологических и агрохимических ограничений. Проведен анализ факторов и их категоризация в зависимости от типа функционального воздействия. Использован инструментарий теории потенциальной эффективности, применение которой подразумевает формализацию цели, в данном случае – повышение энергетической эффективности за счет многопараметрического целеполагания, обеспечивающего требуемый условиями результат. *Результаты исследования.* Разработана концептуальная модель операционных воздействий при получении экологически безопасного утилизационного свиного бесподстилочного навоза, определяющая составляющие удельных энергозатрат, факто-

© Бышов Н. В., Успенский И. А., Юхин И. А., Чаткин М. Н., Лимаренко Н. В., 2020



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

ры, влияющие на них, и предъявляемые к ним ограничения. Модель представляет собой исходные данные для проведения факторного анализа и получения статистических моделей.

Обсуждение и заключение. Практическая значимость работы обусловлена выявлением и категоризацией факторов в зависимости от типа функционального воздействия на операции подготовительного цикла свиного бесподстильного навоза перед его утилизацией. Благодаря этому можно получить исходные данные для формирования частных методик исследования и создания статистических моделей.

Ключевые слова: утилизационный цикл, экологическая безопасность, свиной бесподстильный навоз, подготовка навоза к внесению, энергетическая эффективность, фракционное разделение, обеззараживание жидкой фракции, обезвоживание твердой фракции

Для цитирования: Бышов, Н. В. Концептуальная модель энергетической эффективности получения экологически безопасного утилизационного свиного бесподстильного навоза / Н. В. Бышов, И. А. Успенский, И. А. Юхин [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.394-412 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 394–412.

Conceptual Model of Energy Efficiency for Environmentally Safe Utilization of Liquid Pig Manure

N. V. Byshov^a, I. A. Uspenskiy^{a*}, I. A. Yukhin^a,
M. N. Chatkin^b, N. V. Limarenko^c

^aRyazan State Agrotechnological University

Named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russia)

^bNational Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

^cDon State Technical University (Rostov-on-don, Russia)

*ivan.uspenskiy@yandex.ru

Introduction. The growth of production capacity of livestock enterprises results in increased environmental pressures on bio- and agrocenoses, created by potential energy carriers, one of which is liquid pig manure. Representative parameters, which characterize the energy value, are the total content of nitrogen and its various forms $N_2 = 3...8 \text{ kg/m}^3$; phosphorus oxide $P_2O_5 = 3...6 \text{ kg/m}^3$; potassium oxide $K_2O = 2...4 \text{ kg/m}^3$; chemical oxygen consumption to the mass of organic matter 1.2, biochemical 0.42. In parallel, the groups of Escherichia coli, staphylococci, enterococci, aerobic spore-forming microorganisms, various forms of eggs, protozoan cysts and Eimeria oocysts are also the environmental burden. In addition, the physical and rheological properties of liquid manure can have a significant impact on energy efficiency and the way of its further utilization. In terms of agricultural chemistry, the most rational option for its utilization is fractional use in the form of organic fertilizer that is possible only under the conditions of sanitary and epidemiological safety, which is an energy-intensive process depending on various factors. The purpose of this study is to develop a conceptual model of the energy efficiency of operational impacts in obtaining an environmentally safe cycle of utilizing liquid pig manure.

Materials and Methods. The object of the study is the operational impacts in obtaining an environmentally safe cycle of utilizing liquid pig manure; the subject is the function of maximizing the energy efficiency of this object under the conditions of sanitary-epidemiological and agrochemical restrictions. There is conducted the analysis of factors and their categorization depending on the type of functional impact.

Results. A conceptual model of operational impacts in producing environmentally safe liquid pig manure has been developed, which determines the components of specific energy consumption, the factors affecting them, and the restrictions imposed on them. This model is the source data for the factor analysis and statistical models.

Discussion and Conclusion. The practical significance of the work is the identification and categorization of factors depending on the type of functional impact on the operations of the preparatory cycle of ecologically safe utilization of pig manure that can provide initial data for developing specific research methods and statistical models.

Keywords: utilization cycle, environmental safety, liquid pig manure, preparation of manure for application, energy efficiency, fractional separation, disinfection of the liquid fraction, dehydration of the solid fraction

For citation: Byshov N.V., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., et al. Conceptual Model of Energy Efficiency for Environmentally Safe Utilization of Liquid Pig Manure. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):394-412. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.394-412>

Введение

Согласно Доктрине продовольственной безопасности удельный объем мясомолочной продукции отечественного производства должен составлять не менее 90 %, зерна – не менее 95 %¹. Одной из отраслей, позволяющих внести существенный вклад в реализацию поставленной задачи, является животноводство, в частности свиноводство. Рост производственных мощностей, необходимый для решения поставленной задачи, требует определения оптимальных параметров операционно-технологических воздействий на всех этапах производственного процесса, при этом необходимы минимальные энергетические затраты и максимальный санитарно-эпидемиологический эффект. Установлено, что существенной составляющей индустриального свиноводства, соответствующей обозначенным критериям, является бесподстилочное содержание [1–3].

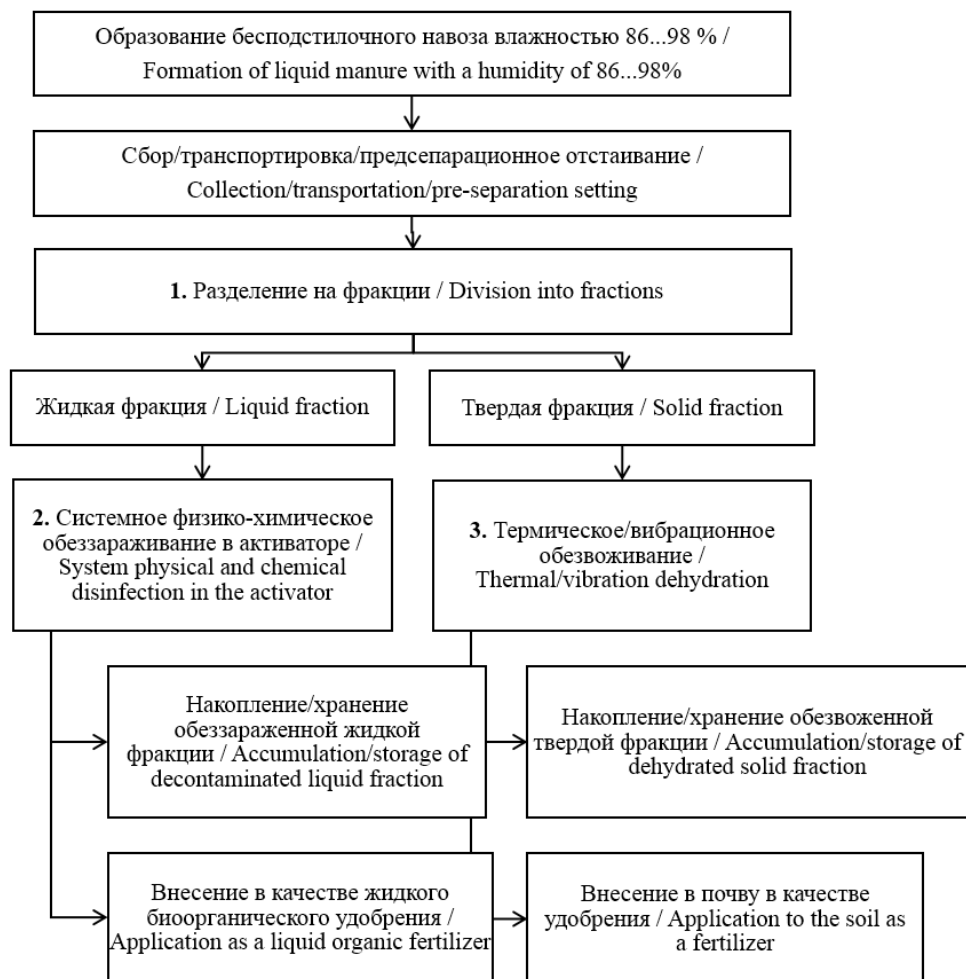
Отходы свиноводства (бесподстилочный навоз) с агрохимической точки зрения являются мощным энергоносителем (общее содержание азота $N_{\text{общ}} = 4...8 \text{ кг/м}^3$; содержание аммиачного аммонийного органического азота $NH_4 = 3...6 \text{ кг/м}^3$; содержание фосфорного ангидрида (оксида фосфора)

$P_2O_5 = 3...6 \text{ кг/м}^3$; содержание оксида калия $K_2O = 2...4 \text{ кг/м}^3$; химическое потребление кислорода (ХПК) к массе органического вещества (ОВ) – 1,2; биохимическое потребление кислорода (БПК) к массе – 0,42, эффективное использование которого затруднено необходимостью обеспечения его безопасности в санитарно-эпидемиологическом плане (свежий навоз соответствует 3 классу опасности, а перепревший – 4) [4; 5]. Соответственно, совершенствование утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза как эффективного агрохимического энергоносителя при минимизации энергетических затрат и соблюдении нормативных санитарно-эпидемиологических требований при обеспечении экологической безопасности для био- и агроценозов является актуальной задачей.

На основании анализа информационных источников на рисунке 1 представлена блок-схема экологически безопасного утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза, на повышение энергетической эффективности операционных воздействий которого и направлено данное исследование [1; 5; 6].

Проанализировав блок-схему на рисунке 1, все операции технологического цикла можно разделить на основ-

¹ Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации: Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/73438425/> (дата обращения: 03.08.2020).



Р и с. 1. Блок-схема энергетически эффективной, экологически безопасной технологии утилизации свиного бесподстильного навоза

Fig. 1. Block diagram of energy-efficient and environmentally safe technology for utilization of liquid pig manure

ные и вспомогательные. К основным отнесем операционные воздействия, направленные на преобразование санитарно-эпидемиологических, экологических и энергетических свойств утилизируемого материала: разделение бесподстильного навоза на фракции 1, системное физико-химическое обеззараживание жидкой фракции в активаторе 2, термическое или вибрационное обезвоживание твердой фракции 3. К вспомогательным – операции, обес-

печивающие технологические взаимодействия между основными блоками: транспортировка, накопление, отстаивание, хранение [7; 8]. Очевидно, что с энергетической точки зрения операционные воздействия, отнесенные к основным, будут являться наиболее энергоемкими [9; 10].

Как показал анализ информационных источников, применение системных методов решения проблемы повышения энергетической эффектив-

ности и экологизации утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза представлено недостаточно полно, что связано с отсутствием систематизации факторов, способных оказывать влияние на энергетические, санитарно-эпидемиологические и экологические составляющие, что делает затруднительным построение концептуальной модели рассматриваемого объекта [11; 12].

Целью настоящего исследования является разработка концептуальной модели энергетической эффективности операционных воздействий при получении экологически безопасного утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза.

Обзор литературы

Использованию теории потенциальной эффективности как инструмента систематизации факторов, оказывающих влияние на состояние объектов и качество их функционирования, посвящено достаточное количество работ [10; 13–15]. Использование общего инструментария теории потенциальной эффективности в области оценки эксплуатационных свойств технических средств представлено в другой работе [16].

В работе А. Ю. Брюханова и коллег представлено применение инструментария теории потенциальной эффективности для формирования обобщенного критерия в виде эколого-энергетического показателя, характеризующего рациональность применения технических средств при выборе утилизационного цикла куриного помета [8]. Данная работа является развитием исследования, посвященного определению критериев энергоэкологической эффективности потенциальных энергоносителей путем применения системного анализа и интеллектуальных алгоритмов управления отходами агропромышленного комплекса (АПК) как многоуровневой группой, состоящей из энергетических, биологических и технологических аспектов [9]. Исследование вносит су-

щественный вклад в формирование концептуальных моделей энергетической эффективности утилизационных циклов отходов. В работе А. А. Ковалева с помощью инструментария теории потенциальной эффективности, а именно функций соответствия, предложены закономерности, определяющие результативность функционирования технических средств обработки органических отходов [10]. В исследованиях ряда ученых представлены частные методики, демонстрирующие целесообразность использования теории потенциальной эффективности как инструмента минимизации энергетических затрат в зависимости от прилагаемых условий, в области сушки барды пищевых производств – применения жидкой фракции бесподстилочного навоза под яровую пшеницу, очистки воскового сырья в воде при механическом перемешивании и т. д. [11; 13; 17]. Соответственно, можно сделать вывод об унифицированности данного инструмента. Также установлено, что сочетание использования инструментария теории потенциальной эффективности при создании концептуальных моделей операционных воздействий технических средств является перспективным систематизирующим инструментом, применимым во многих областях науки и техники [7; 11; 15; 16].

Поскольку выбор технического средства и его конструктивно-технологических параметров во многом определяет энергетическую эффективность и экологичность утилизационного цикла, стоит рассмотреть принцип действия технических средств, реализующих основные операционные воздействия утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза (рис. 1).

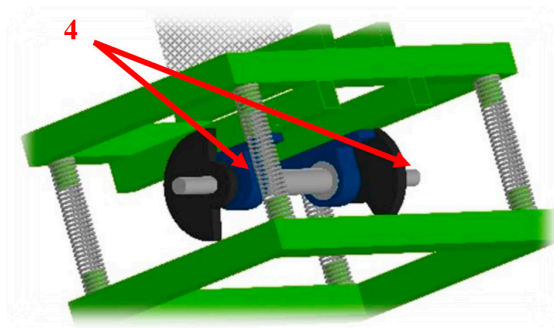
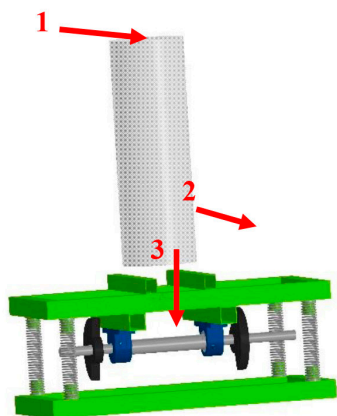
Энергетические затраты утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза в биоорганическое удобрение во многом зависят от эффективности его фракционного разделения [13; 17; 18]. Несмотря на традиционный подход,

подразумевающий использование термических воздействий, перспективным решением данной задачи является применение вибрационных воздействий (рис. 2). Реализовать их можно следующим образом: бесподстилочный навоз загружается в рабочую камеру, смонтированную на упруго-диссипативных колебательных элементах, представляющих собой инерционный вибратор с циклической частотой колебаний 15...50 Гц и амплитудой 0,5...9 мм. В процессе вибрационного воздействия бесподстилочный навоз непрерывно подвергается знакопеременным ускорениям, что интенсифицирует два вида движений: возвратно-поступательное и вращательно-циркуляционное движение. От стенок рабочей камеры вибрация передается прилегающей к ней обрабатываемой среде на протяжении всего ее фазово-дисперсного портрета. Под действием комплекса механических сил (центробежной, центроостремительной, силы давления потока, силы тяжести в сочетании с приложенным виброинерционным воздействием) реализуется процесс сепарации бесподстилочного навоза на твердую

(влажность $\leq 85\%$) и жидкую фракции (влажность $> 92\%$).

Отличительной возможностью данного технического средства является возможность его использования в режиме виброобезвоживателя твердой фракции свиного бесподстилочного навоза, полученной в результате разделения утилизируемого энергоносителя путем изменения массы дисбалансов, что в значительной мере повышает степень унификации вибрационного сепаратора/обезвоживателя [19; 20].

На основании серии исследований установлено, что перспективным техническим средством реализации операционного воздействия по дополнительному обеззараживанию жидкой фракции бесподстилочного навоза является использование электромагнитного активатора (рис. 3) [10; 21; 22]. Принцип действия заключается в системном воздействии на жидкую фракцию вращающего переменного магнитного поля совместно с рабочими телами, представляющими собой ферромагнитные стержни совместно с химическим реагентом (наиболее эффективны содержащие хлор реагенты: гипохлорит



Р и с. 2. Модель вибрационного сепаратора/обезвоживателя: 1 – подача бесподстилочного навоза; 2 – отвод жидкой фракции; 3 – отвод твердой фракции; 4 – дисбалансы, количество и положение которых определяют режим работы вибрационной системы

F i g. 2. Model of vibration separator/dehumidifier: 1 – submission of liquid manure; 2 – removal of the liquid fraction; 3 – the removal of the solid fraction; 4 – imbalances, the number and position of which determine the mode of operation of the vibration system

кальция $\text{Ca}(\text{Cl})\text{OCl}$, гипохлорит натрия NaClO , диоксид хлора ClO_2 , хлорамин NH_2Cl , в основании которых лежит активный хлор) [23; 24]. В зависимости от условий эксплуатации отношение длины ферромагнитных стержней к диаметру лежит в диапазоне $l/d = 5 \dots 25$, масса составляет от 0,5 до 1,5 кг, уровень магнитной индукции $B = 40 \dots 60$ мТл [22; 25; 26]. Использование данного типа воздействий позволяет существенным образом интенсифицировать тепло-массообменные и диффузионные процессы в рабочей зоне активатора, а механические воздействия приводят к лизису клеток бактериальных оболочек² [23].



Р и с. 3. Электромагнитный активатор обеззараживания жидкой фракции
F i g. 3. Electromagnetic activator for liquid fraction disinfection

Материалы и методы

В качестве объекта исследования при формировании концептуальной модели энергетической эффективности утилизационного свиного бесподстилочного навоза выступали его операционные воздействия, а предметом — функция максимизации энергетической эффективности данного объекта в условиях санитарно-эпидемиологических и агрохимических ограничений.

Стоит рассмотреть основной инструментарий теории потенциальной эффективности. Понятие «эффективность» является комплексным и включает целые категории параметров, значения которых требуют минимизации/максимизации в зависимости от предъявляемых условий. Оптимальной эффективностью считается нахождение определенных соотношений этих параметров, обеспечивающих заданное положение наиболее информативной целевой функции.

Информативность целевой функции определяется путем введения глобального критерия эффективности процесса и локальных параметров, обеспечивающих наиболее рациональные условия операций. При этом применение теории эффективности подразумевает формализацию цели за счет многопараметрического целеполагания $U_{\text{ТР}}$ (требуемый результат), обеспечивающего требуемый условиями результат. Очевидно, что многопараметрическое целеполагание может быть эффективно обеспечено только путем применения перечня количественных и качественных параметров, оказывающих влияние на обозначенную цель в рамках проблемной ситуации. Под проблемной ситуацией в теории эффективности принято понимать разницу несоответствия реального и ожидаемого состояний технических систем. Разрешить проблемную ситуацию с точки зрения теории эффективности можно путем выполнения комплекса мероприятий по преобразованию некоторого объема имеющихся ресурсов (энергетических, технологических, временных и т. п.), направленных на достижение требуемого результата. Такую совокупность действий принято называть операцией. Реальный результат $U_{\text{Ре}}$ операции (фактический

² Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. Киев: Техника, 1976. 113 с.; Вершинин И. Н., Вершинин Н. П. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем. Сальск, 2007. 368 с.; Адошев А. И. Ферровихревой аппарат для обеззараживания жидкого свиного навоза: дис. ... канд. техн. наук. Ставрополь, 2011. 190 с.

и ожидаемый) есть тот результат, который получен или может быть получен при проведении операции. В силу влияния различного рода факторов реальный результат Y_{Re} операции может отличаться от требуемого Y_{TP} . При этом эффективность операций определяется соответствием реального результата выполнения преобразования ресурсов требуемому и позволяет оценивать этот процесс как степень достижения цели³.

Вне зависимости от категории рассмотрения инструментарий теории эффективности включает в себя определение показателя эффективности, характеризующего степень достижения соответствия реального состояния объекта к требуемому. Нахождение данного показателя осуществляется следующим образом. Определяется показатель достижения результата выполнения n -й операции в виде мерного вектора Q , представляющего целевой эффект, характеризуемый затратами времени t и ресурсов P :

$$Y_{Re}^n = \{Q_{Re}^n, t_{Re}^n, P_{Re}^n\}.$$

Затем формулируются граничные условия вектора целеполагания, позволяющие определить область допустимых значений с качественной точки зрения для n -й операции:

$$Y_{TP}^n = \{Q_{TP}^n, t_{TP}^n, P_{TP}^n\}.$$

где Q_{TP}^n – целевой эффект n -ой операции утилизационного цикла; t_{TP}^n – временные затраты реализации n -ой операции утилизационного цикла; P_{TP}^n – ресурсные затраты реализации n -й операции утилизационного цикла.

$$\begin{aligned} Q_{TP}^n &= \{Q_{TPmin}^n \leq Q_{TP}^n \leq Q_{TPmax}^n ; \\ Q_{TPmin}^{n2} \leq Q_{TP}^{n2} \leq Q_{TPmax}^{n2} ; Q_{TPmin}^{n3} \leq Q_{TP}^{n3} \leq Q_{TPmax}^{n3} ; \\ Q_{TPmin}^{n...} \leq Q_{TP}^{n...} \leq Q_{TPmax}^{n...} ; Q_{TPmin}^n \leq Q_{TP}^n \leq Q_{TPmax}^n . \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_{TPO}^n &= \{t_{TPmin}^{n1} \leq t_{TP}^{n1} \leq t_{TPmax}^{n1} ; \\ t_{TPmin}^{n2} \leq t_{TP}^{n2} \leq t_{TPmax}^{n2} ; t_{TPmin}^{n3} \leq t_{TP}^{n3} \leq t_{TPmax}^{n3} ; \\ t_{TPmin}^{n...} \leq t_{TP}^{n...} \leq t_{TPmax}^{n...} ; t_{TPmin}^n \leq t_{TP}^n \leq t_{TPmax}^n . \\ P_{TPO}^n &= \{P_{TPmin}^{n1} \leq P_{TP}^{n1} \leq P_{TPmax}^{n1} ; \\ P_{TPmin}^{n2} \leq P_{TP}^{n2} \leq P_{TPmax}^{n2} ; P_{TPmin}^{n3} \leq P_{TP}^{n3} \leq P_{TPmax}^{n3} ; \\ P_{TPmin}^{n...} \leq P_{TP}^{n...} \leq P_{TPmax}^{n...} ; P_{TPmin}^n \leq P_{TP}^n \leq P_{TPmax}^n . \end{aligned}$$

После того как определены показатели достижения результата и их граничные условия, необходимо ввести функцию соответствия, характеризующую в некоторой матричной шкале степень достижения цели операции:

$$\rho = f \{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\}.$$

Степень достижения цели при выполнении операции определяется с помощью математического ожидания показателя эффективности n -й операции:

$$M_i^{оп} = M \left[f \{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\} \right],$$

где M – математическое ожидание, определяемое через интеграл Лебега:

$$\begin{aligned} M &= M \left[f \{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\} \right] = \\ &= \int_x \left[f \{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\} \right] P_{[f\{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\}]}(dx), \end{aligned}$$

где x – множество всех возможных значений $\left[f \{Y_{Re}^n, Y_{TP}^n\} \right]$.

Энергетическая эффективность – комплексный показатель результативности реализации операции или процесса, подразумевающий минимизацию удельных энергетических затрат при соблюдении накладываемых технологических ограничений. Рост энергетической

³ Кокорев Г. Д. Повышение эффективности системы технической эксплуатации автомобилей в сельском хозяйстве на основе инженерно-кибернетического подхода: дис. ... д-ра. техн. наук. Саранск, 2014. 457 с.; Надежность и эффективность в технике. Методология. Организация. Терминология: справочник / Под ред. А. И. Рембезы. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

эффективности технического средства или операции заключается в проведении комплекса системных мероприятий, направленных на максимизацию активной составляющей общих удельных энергетических затрат, то есть эффективного преобразования энергии из одной формы в другую, сопровождающегося достижением технологического эффекта при общей минимизации реактивных (паразитных) составляющих удельных энергетических затрат.

Первым этапом оценки энергетической эффективности является создание концептуальной модели, позволяющей определить целевые функции, факторы, способные оказывать наиболее существенное влияние на них, и ограничения, предъявляемые к исследуемому объекту с точки зрения качества.

Согласно ГОСТу Р 52777-2007 комплекс мероприятий энергетической оценки стационарных агрегатов с приводом от асинхронных электрических двигателей сводится к определению следующих показателей: активной и реактивной мощности; среднего коэффициента мощности и удельных энергозатрат (удельной энергоёмкости)⁴. Однако для оценки энергетической эффективности необходимо рассмотреть конструктивно-технологические составляющие каждой операции, способные оказывать влияние на параметры назначения, регламентируемые рассмотренным ГОСТом.

Общая (номинальная) потребляемая энергия чаще всего складывается из трех основных составляющих, однако для повышения адекватности модели в ряде случаев уместно введение дополнительных параметров⁵:

$$N_{gen} = N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n,$$

где N_1 – мощность, затрачиваемая на выполнение операции с требуемым

технологическим эффектом, кВт; N_2 – мощность, затрачиваемая на привод рабочих органов технологических систем, кВт; N_3 – мощность, затрачиваемая на подачу технологического материала в соответствующее устройство, кВт; N_n – мощность, затрачиваемая на дополнительные технологические операции, Вт.

В общем виде мощность, затрачиваемая на выполнение операции с требуемым технологическим эффектом при утилизации свиного бесподстилочного навоза, может быть представлена как:

$$N_1 = N_{fs} + N_{da} + N_{sfd}, \quad (1)$$

где N_{fs} – удельная мощность фракционного сепаратора, кВт·час/м³; N_{da} – удельная мощность активатора обеззараживания жидкой фракции, кВт·час/м³; N_{sfd} – удельная мощность обезвоживателя твердой фракции, кВт·час/кг.

Результаты исследования

Для разработки аналитической модели энергетической эффективности рассматриваемого утилизационного цикла стоит воспользоваться тремя составляющими ее мощности, которые в общем виде представлены формулой (1).

Рассмотрим составляющие удельной мощности фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза:

$$N_{fs} = f(P_{fs}, Q_{fs}, \cos \varphi), \quad (2)$$

где P_{fs} – активная мощность, кВт; Q_{fs} – реактивная мощность, кВАр; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности.

Активная мощность фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза характеризуется энергией, совершившей необратимое преобразование из одной формы в другую, и определяется как интеграл, равный периоду

⁴ ГОСТ Р 52777-2007. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки.

⁵ Успенский И. А. Основы совершенствования технологического процесса и снижения энергозатрат картофелеуборочных машин: дис. ... д-ра. техн. наук. Москва, 1997. 396 с.

мгновенной мощности фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза $P_{\text{фр.сеп.}}$:

$$P_{fs} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{fs} dt, \quad (3)$$

$$= u_{fs} \cdot i_{fs} = U_{mfs} I_{mfs} \sin^2(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

где u_{fs} – мгновенное значение напряжения в энергетической цепи фракционного сепаратора, В; i_{fs} – мгновенное значение силы тока в энергетической цепи фракционного сепаратора, А; U_{mfs} – амплитудное значение напряжения в энергетической цепи фракционного сепаратора, В; I_{mfs} – амплитудное значение силы тока в энергетической цепи фракционного сепаратора, А; ω – угловая частота колебаний электрического тока в сети, Гц; φ – угол сдвига фаз между силой тока ϕ_i и напряжением ϕ_u :

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i. \quad (5)$$

При этом активная мощность является функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров сепаратора:

$$P_{fs} = f\{W_{in}, Sed_{in}, \rho_{in}, k_{in}, W_{lf}, Sed_{lf}, \rho_{lf}, k_{lf}, W_{sf}, Sed_{sf}, \rho_{sf}, k_{sf}, V_{wafs}, t_s, n_{sfq}, m_{db}\}, \quad (6)$$

где W_{in} – исходная влажность свиного бесподстилочного навоза, подаваемого в сепаратор, %; Sed_{in} – седиментационный коэффициент, характеризующий однородность фазового портрета сепарируемого свиного бесподстилочного навоза; ρ_{in} – исходная плотность подаваемого в сепаратор бесподстилочного навоза, кг/м³; k_{in} – коэффициент, характеризующий исходное истечение свиного бесподстилочного навоза во фракционный сепаратор; W_{lf} – влажность жидкой фракции, отводимой из сепаратора, %; Sed_{lf} – седиментационный

коэффициент, характеризующий однородность фазового портрета жидкой фракции; Sed_{sf} – седиментационный коэффициент, характеризующий однородность фазового портрета твердой фракции; ρ_{lf} – плотность жидкой фракции, отводимой из сепаратора, кг/м³; k_{lf} – коэффициент, характеризующий истечение отводимой из сепаратора жидкой фракции; W_{sf} – влажность твердой фракции, отводимой из сепаратора, %; ρ_{sf} – плотность твердой фракции, отводимой из сепаратора, кг/м³; k_{sf} – коэффициент, характеризующий истечение твердой фракции, отводимой из сепаратора; V_{wafs} – объем рабочей зоны фракционного сепаратора, м³; t_s – продолжительность сепарации, мин; n_{sfq} – частота вращения вала фракционного сепаратора, мин⁻¹; m_{db} – масса дисбалансов на валу фракционного сепаратора, кг.

Реактивная мощность фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза характеризуется энергией, циркулирующей в контуре и каждую четверть полупериода возвращающейся к источнику при условии использования синусоидального источника напряжения промышленной циклической частоты колебаний электрического тока, и определяется как интеграл равный периоду мгновенной реактивной мощности фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза $q_{\text{фр.сеп.}}$:

$$Q_{fs} = \int_0^T q_{fs} dt, \quad (7)$$

$$= U_{mfs} I_{mfs} \cos^2(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

При этом реактивная мощность является функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров сепаратора:

$$Q_{fs} = f\{W_{in}, Sed_{in}, \rho_{in}, k_{in}, W_{lf}, Sed_{lf}, \rho_{lf}, k_{lf}, W_{sf}, Sed_{sf}, \rho_{sf}, k_{sf}, V_{wafs}, t_s, n_{sfq}, m_{db}\}. \quad (9)$$

Коэффициент, характеризующий энергетическую эффективность выполняемой операции, определяется отношением мгновенных значений активной мощности к полной, представляющей корень квадратный из суммы квадратов мгновенных значений активной и реактивной мощностей:

$$\cos \varphi = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T p dt}{\sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T p dt\right)^2 + \left(\int_0^T q dt\right)^2}}. \quad (10)$$

Удельная мощность активатора обеззараживания жидкой фракции характеризуется функцией от энергии, совершившей необратимое преобразование из одной формы в другую, и энергии, циркулирующей в колебательном энергетическом контуре:

$$N_{da} = f(P_{da}, Q_{da}, \cos \varphi). \quad (11)$$

При этом активная мощность является функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров активатора:

$$P_{da} = f\{W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, pH_1, \omega, \rho_{wa1}, m_{wb1}, K_2, pH_2, NPK, ХПК, БПК, \cos \varphi, V_{wada}, t_d, \rho_{wa2}, m_{wb2}, B, f_i, Q_{tr}\}, \quad (12)$$

где W – влажность подаваемой фракции, %; Sed_{in}, Sed_{lf} – седиментационный коэффициент, характеризующий однородность фазового портрета фракции до и после технологического воздействия; $K_1 = f(\text{КОЕ ОКБ}_1, \text{БОЕ}_1, \text{ТТКБ}_1, \text{ТКФСТК}_1)$ – уровень экологической нагрузки (бактериологическая обсемененность) подаваемой в активатор жидкой фракции, шт; $K_2 = f(\text{КОЕ ОКБ}_2, \text{БОЕ}_2, \text{ТТКБ}_2, \text{ТКФСТК}_2)$ – уровень экологической нагрузки (бактериоло-

гической обсемененности) фракции до и после технологического воздействия, шт; pH_1, pH_2 – уровень pH фракции до и после технологического воздействия; ρ_{wa1}, ρ_{wa2} – уровень заполненности рабочими телами рабочей зоны активатора до и после технологического воздействия, %; m_{wb1}, m_{wb2} – масса рабочих тел до и после технологического воздействия, кг; ω – концентрация химического реагента, мг/л; V_{wada} – объем рабочей зоны активатора обеззараживания, м³; NPK – группа параметров оценки удобрительной агрохимической ценности, %; $ХПК$ – химическое потребление кислорода, мг/л; $БПК$ – биологическое потребление кислорода, мг/л; t_d – продолжительность воздействия, мин; B – уровень магнитной индукции в рабочей зоне индуктора активатора, мТл; f_i – циклическая частота колебаний электрического тока в энергетической цепи устройства, Гц; Q_{tr} – реактивная мощность трансформатора тока энергетической цепи активатора обеззараживания, ВАр.

Физическая природа реактивной составляющей активатора обеззараживания соответствует зависимостям (7), (8), являясь при этом функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров активатора обеззараживания:

$$Q_{da} = f\{W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, pH_1, \omega, \rho_{wa1}, m_{wb1}, K_2, pH_2, NPK, ХПК, БПК, \cos \varphi, V_{wada}, t_d, \rho_{wa2}, m_{wb2}, B, f_i, Q_{tr}\}. \quad (13)$$

Удельная мощность обезвоживателя твердой фракции характеризуется энергией, совершившей необратимое преобразование из одной формы в другую, энергией, циркулирующей в колебательном энергетическом контуре, и их коэффициентом мощности:

$$N_{sfd} = f(P_{sfd}, Q_{sfd}, \cos \varphi), \quad (14)$$

Активная мощность обезвоживателя твердой фракции является функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров:

$$P_{sfd} = f\{W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, pH_1, K_2, pH_2, NPK, ХПК, БПК, V_{wasfd}, t_{sfd}, f_i, n_{ssfd}, m_{db}\}, \quad (15)$$

где V_{wasfd} – объем рабочей зоны обезвоживателя твердой фракции, м³; t_{sfd} – продолжительность воздействия, мин; f_i – циклическая частота колебаний электрического тока в энергетической цепи обезвоживателя твердой фракции, Гц; n_{ssfd} – частота вращения вала обезвоживателя твердой фракции, мин⁻¹.

Физическая природа реактивной составляющей обезвоживателя твердой фракции соответствует зависимостям (7), (8), при этом также являясь функцией зависимости от группы конструктивно-технологических параметров обезвоживателя твердой фракции:

$$Q_{sfd} = f\{W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, pH_1, K_2, pH_2, NPK, ХПК, БПК, V_{wasfd}, t_{sfd}, f_i, n_{ssfd}, m_{db}\}. \quad (16)$$

Удельные затраты мощности, направленные на вспомогательные операции (подачу свиного бесподстилочного навоза в соответствующие технические средства, реализующие основные операции, а также системы накопления/хранения и т. п.), могут складываться из следующих составляющих:

$$N_2 = N_{trlm} + N_{pump} + N_{hom} \quad (17)$$

где N_{trlm} – удельная мощность транспортеров бесподстилочного свиного навоза, кВт·час/м³; N_{pump} – удельная мощность насосов, обеспечивающих перекачивание свиного бесподстилочного навоза, кВт·час/м³; N_{hom} – удельная мощность гомогенизирующих

устройств и других технических систем, обеспечивающих поддержание требуемого фазового состояния при отстаивании/накоплении/хранении утилизируемого материала, кВт·час/м³.

На основании анализа информационных источников установлено, что энергозатраты N_2 будут определяться прежде всего зависимостью от физико-механических свойств утилизируемого энергоносителя для всех технических средств, выполняющих вспомогательные операции [6; 7; 9; 16]:

$$N_2 = \frac{1}{T} \int_0^T p_2 dt, \quad (18)$$

$$= (U_{mtrlm} I_{mtrlm} \sin^2(\omega t + \varphi)) + (U_{mpump} I_{mpump} \sin^2(\omega t + \varphi)) + (U_{mhom} I_{mhom} \sin^2(\omega t + \varphi)). \quad (19)$$

Активная мощность технических средств, реализующих вспомогательные операции технологического цикла утилизации свиного бесподстилочного навоза, определяется:

$$p_2 = \frac{N_2}{\sqrt{2}} = f(W, t, Sed_{in}, K_1, pH, NPK, ХПК, БПК). \quad (20)$$

Реактивная мощность технических средств, реализующих вспомогательные операции технологического цикла утилизации свиного бесподстилочного навоза, определяется:

$$q_2 = \frac{Q_2}{\sqrt{2}} = f(W, t, Sed_{in}, K_1, pH, NPK, ХПК, БПК). \quad (21)$$

Удельные затраты мощности на привод рабочих органов технологических систем, реализующих основные операции цикла утилизации свиного бесподстилочного навоза, могут составлять порядка 25...30 % от удельной

мощности, затрачиваемой на выполнение технологических воздействий, однако для уточнения этих значений необходимо провести дополнительные исследования [16; 22; 25; 26]:

$$N_3 = 25 \dots 30 \% (N_1 + N_2). \quad (22)$$

Обсуждение и заключение

Разработка систем рационального природопользования напрямую зависит от рациональности использования потенциальных энергоносителей, таких как свиной бесподстилочный навоз. Неоспоримой является важность повышения энергетической эффективности и экологизации утилизационных циклов подобных систем.

Обобщив результаты анализа составляющих энергетической эффективности при экологически безопасном утилизационном цикле свиного бесподстилочного навоза, получили концептуальную модель, включающую следующие составляющие:

$$\begin{aligned} N_{ulm}^{m+a} &= N_{fs} = f(P_{fs}, Q_{fs}, \cos \varphi), \\ N_{da} &= f(P_{da}, Q_{da}, \cos \varphi), \\ N_{sfd} &= f(P_{sfd}, Q_{sfd}, \cos \varphi), \end{aligned} \quad (23)$$

где N_{fs} – концептуальная модель удельной мощности фракционного сепаратора свиного бесподстилочного навоза:

$$\begin{aligned} N_{fs} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{fs} dtf (W_{in}, Sed_{in}, \rho_{in}, \\ &k_{in}, W_{lf}, Sed_{lf}, \rho_{lf}, k_{lf}, W_{sf}, Sed_{sf}, \\ &\rho_{sf}, k_{sf}, V_{wafs}, t_s, n_{sfq}, m_{db}) + \\ &+ \int_0^T q_{fs} dtf (W_{in}, Sed_{in}, \rho_{in}, k_{in}, \\ &W_{lf}, Sed_{lf}, \rho_{lf}, k_{lf}, W_{sf}, Sed_{sf}, \\ &\rho_{sf}, k_{sf}, V_{wafs}, t_s, n_{sfq}, m_{db}) + \\ &+ \frac{P_{fs}}{\sqrt{(P_{fs})^2 + (Q_{fs})^2}}. \end{aligned} \quad (24)$$

N_{da} – концептуальная модель удельной мощности активатора обеззараживания жидкой фракции:

$$\begin{aligned} N_{da} &= \frac{1}{T} \int_0^T p_{da} dtf (W, Sed_{in}, Sed_{lf}, \\ &K_1, pH_1, \omega, \rho_{wa1}, m_{wb1}, K_2, pH_2, \\ &NPK, ХПК, БПК, \cos \varphi, V_{wada}, \\ &t_d, \rho_{wa2}, m_{wb2}, B, f_i, Q_w) + \\ &+ \int_0^T q_{da} dtf (W, Sed_{in}, Sed_{lf}, K_1, \\ &pH_1, \omega, \rho_{wa1}, m_{wb1}, K_2, pH_2, \\ &NPK, ХПК, БПК, \cos \varphi, V_{wada}, \\ &t_d, \rho_{wa2}, m_{wb2}, B, f_i, Q_w) + \\ &+ \frac{P_{da}}{\sqrt{(P_{da})^2 + (Q_{da})^2}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Удельная мощность N_{drWB} , затрачиваемая на привод рабочих органов, будет составлять:

$$N_{drWB} = 25 \dots 30 \% (N_{ulm}^{m+a}), \quad (27)$$

$$N = N_{ulm}^{m+a} + N_{drWB}. \quad (28)$$

Концептуальная модель операционных воздействий при получении экологически безопасного утилизационного свиного бесподстилочного навоза позволяет определить составляющие удельных энергетических затрат при определенных факторах.

Разработанная модель позволит повысить энергетическую эффективность при разработке, проектировании и эксплуатации технологии переработки жидкого свиного навоза путем выявления факторов способных оказывать влияние на операционные воздействия на каждом из этапов.

Зависимости (24), (25), (26) представляет собой исходные данные для проведения факторного анализа и оп-

ределения их влияния на обозначенные целевые функции с последующим получением статистических моделей, позволяющих определить рациональные параметры операционных воздействий.

Полученные концептуальные основы энергетической эффективности при экологически безопасной утилизации свиного бесподстилочного навоза позволяют предложить системную методику определения целевых функций в виде векторов целеполагания, граничных условий и условий достижения на основании теории потенциальной эффективности.

Следующим этапом развития данного направления является разработка автоматизированного програм-

многo комплекса, формирующего концептуальную модель энергетической эффективности в зависимости от накладываемых условий в виде графоаналитического представления распределения удельных энергетических затрат по категориям.

Практическая значимость работы подтверждена выявленными и категоризованными системами факторов в зависимости от типа функционального воздействия операции утилизационного цикла свиного бесподстилочного навоза, что может представлять исходные данные для формирования частных методик исследования и создания статистических моделей при экологически безопасной утилизации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Измайлов, А. Ю.** Создание инновационной техники и ресурсосберегающих технологий производства кормов – основа развития животноводства / А. Ю. Измайлов, Я. П. Лобачевский, О. С. Марченко [и др.] // Вестник ФГБОУ ВО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2017. – № 6 (82). – С. 23–28.

2. **Briukhanov, A.** Method of Designing of Manure Utilization Technology / A. Briukhanov, I. Subbotin, R. Uvarov [et al.] // *Agronomy Research*. – 2017. – Vol. 15, Issue 3. – Pp. 658–663. – URL: https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/05/Vol15Nr3_Briukhanov.pdf (дата обращения: 03.08.2020).

3. **Павлов, П. И.** Эффективные средства механизации для удаления и утилизации навоза / П. И. Павлов // *Естественные и технические науки*. – 2017. – № 3 (105). – С. 87–89.

4. **Хмыров, В. Д.** Эффективность системы применения удобрений в органическом земледелии / В. Д. Хмыров, Б. С. Труфанов, О. И. Журавлева // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. – 2019. – № 3 (58). – С. 14–18. – URL: http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/vestnik_3_2019.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

5. **Еськов, А. И.** Современное состояние и перспективы использования органических удобрений в сельском хозяйстве России / А. И. Еськов, С. М. Лукин, Г. Е. Мерзлая // *Плодородие*. – 2018. – № 1 (100). – С. 20–23. – URL: http://plodorodie-j.ru/journal/2018/nomer_one/2018-1-20-23.html (дата обращения: 03.08.2020).

6. **Шигапов, И. И.** Технология переработки навозной массы / И. И. Шигапов, А. В. Поросятников, О. Н. Краснова // *Сельский механизатор*. – 2019. – № 5. – С. 28–29. – URL: http://selmech.msk.ru/519.html#_Технология_переработки_навозной (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

7. **Субботин, И. А.** Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве / И. А. Субботин, А. Ю. Брюханов, Е. В. Тимофеев [и др.] – DOI 10.15507/2658-4123.029.201903.366-382 // *Инженерные технологии и системы*. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 366–382. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles-2-en/84-19-3/715-10-15507-0236-2910-029-201903-3> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

8. Брюханов, А. Ю. Экологоэнергетический показатель внедрения наилучших доступных технологий утилизации куриного помета / А. Ю. Брюханов, И. А. Субботин, Е. В. Тимофеев [и др.] – DOI 10.18412/1816-0395-2019-12-29-33 // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 12. – С. 29–33. – URL: <https://www.ecology-kalvis.ru/jour/article/view/1413> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

9. Ракутько, С. А. Энергоэкологические основы наилучших доступных технологий светокультуры / С. А. Ракутько. – DOI 10.24411/0131-5226-2019-10121 // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2019. – № 1 (98). – С. 44–60. – URL: <https://www.szni.ru/images/IAEP/jurnal/jurnali/Jurnal98.pdf> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

10. Ковалев, А. А. Энергетическая эффективность предварительной обработки синтетического субстрата метантенка в аппарате вихревого слоя / А. А. Ковалев, Д. А. Ковалев, В. С. Григорьев. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202001.092-110 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 1. – С. 92–110. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/88-20-1/759-10-15507-0236-2910-030-202001-6> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

11. Суржко, О. А. Повышение энергетической эффективности при сушке барды пищевых производств / О. А. Суржко, М. А. Куликова, Н. Г. Моиссенко [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16, № 4 (3). – С. 627–630. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-pri-sushke-bardy-pishevyh-proizvodstv/viewer> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

12. Гоман, Н. В. Эффективность применения жидкой фракции бесподстилочного свиного навоза под яровую пшеницу на лугово-черноземной почве / Н. В. Гоман, И. А. Бобренко, Н. К. Трубина [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2018. – № 5 (140). – С. 51–59. – URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2018_5/content/9.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

13. Киров, Ю. А. Повышение эффективности разделения на фракции стоков пивоваренного производства в гидроциклоне-сгустителе / Ю. А. Киров, Н. В. Батищева, В. С. Шкрабак // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 1 (50). – С. 207–213. – URL: https://spbgau.ru/files/nid/6995/izvestiya_no50.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

14. Бышов, Д. Н. Исследование эффективности очистки воскового сырья в воде при интенсивном механическом перемешивании / Д. Н. Бышов, Д. Е. Каширин, В. В. Павлов [и др.] // Вестник КрасГАУ. – 2017. – № 12 (135). – С. 115–122. – URL: http://www.kgau.ru/vestnik/2017_12/content/19.pdf (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

15. Куликова, М. А. Оценка эффективности нового органоминерального удобрения на основе свиного навоза / М. А. Куликова, Т. А. Колесникова, Е. А. Грибут [и др.] – DOI 10.25680/S19948603.2019.109.16 // Плодородие. – 2019. – № 4 (109). – С. 49–51. – URL: <http://plodorodie-j.ru/journal/2019/4-2019/2019-4-49-51.html> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

16. Бышов, Н. В. Повышение эффективности перевозок плодоовощной продукции в АПК / Н. В. Бышов, С. Н. Борычев // Вестник РГАУ им. П. А. Костычева. – 2016. – № 5. – С. 38–40.

17. Сычев, В. Г. Исследование динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв / В. Г. Сычев, Л. К. Шевцова, Г. Е. Мерзлая. – DOI 10.7868/S0002188118020011 // Агрохимия. – 2018. – № 2. – С. 3–21. – URL: <https://www.libnauka.ru/item.php?doi=10.7868/S0002188118020011> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

18. Шигапов, И. И. Модель биотехнической системы процесса уборки, транспортировки и переработки навоза / И. И. Шигапов // Аграрная наука. – 2017. – № 3. – С. 27–31. – URL: <https://www.vetpress.ru/jour/article/view/53> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

19. Бышов, Н. В. Исследование распределения плотности вероятностей патогенных маркеров свиного бесподстилочного навоза / Н. В. Бышов, Н. В. Лимаренко, И. А. Успенский [и др.]. – DOI 10.32786/2071-9485-2019-04-26 // Известия нижевожского агроуниверситетского комплекса. – 2019. – № 4 (56). – С. 215–227. – URL: http://www.volgau.com/Portals/0/static/izvestiya_auk/izv_auk_056/izv_auk_056_st_26.pdf?ver=2020-01-31-101602-813 (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

20. **Byshov, N. V.** Ecological and Technological Criteria for the Efficient Utilization of Liquid Manure / N. V. Byshov, I. A. Uspensky, I. A. Yukhin [et al.]. – DOI 10.1088/1755-1315/422/1/012069 // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – № 422. – 5 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/422/1/012069/pdf> (дата обращения: 03.08.2020).

21. **Лимаренко, Н. В.** Создание математической модели технологического процесса обеззараживания стоков животноводства / Н. В. Лимаренко // Известия ВУЗов. Пищевая технология. – 2017. – № 3. – С. 108–112. – URL: <https://ivpt.kubstu.ru/tocs/356-357/31> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

22. **Месхи, Б. Ч.** Создание математической модели для оценки энергоёмкости процесса обеззараживания стоков животноводства / Б. Ч. Месхи, Н. В. Лимаренко, В. П. Жаров [и др.]. – DOI 10.23947/1992-5980-2017-17-4-129-135 // Вестник Донского государственного технического университета. – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 129–135. – URL: <https://vestnik.donstu.ru/jour/article/view/192/193> (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

23. **Патент № 2668906 Российская Федерация, МПК В01F 13/08 (2006.01), СПКВ01F 13/08 (2018.08).** Индуктор с замкнутым перемещением рабочих тел : № 2018106113 : заявл. 19.02.2018 : опубл. 04.10.2018 / Лаврентьев А. А., Ананченко Л. Н., Лимаренко Н. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». – 6 с.: ил.

24. **Патент № 2680073 Российская Федерация, МПК С02F 1/48 (2006.01), С02F 1/50 (2006.01), А01N 25/02 (2006.01), С02F 1/76 (2006.01).** Способ обеззараживания жидких сред : № 2018113501 : заявл. 13.04.2018 : опубл. 14.02.2019 / Жаров В. П., Шаповал Б. Г., Лимаренко Н. В. ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет». – 5 с.

25. **Успенский, И. А.** Исследование влияния параметров рабочих тел индуктора на коэффициент мощности / И. А. Успенский, И. А. Юхин, Г. А. Борисов [и др.] – DOI 10.32786/2071-9485-2019-03-45 // Известия нижевожского агроуниверситетского комплекса. – 2019. – № 3 (55). – С. 360–369. – URL: http://www.volgau.com/Portals/0/static/izvestiya_auk/izv_auk_055/izv_auk_055_st_45.pdf?ver=2019-10-24-135950-203 (дата обращения: 03.08.2020). – Рез. англ.

26. **Byshov, N. V.** Parameters of Optimized System of Technological Process of Waste Water Disinfection of Livestock Enterprises in Integrated Physico-Chemical Effects / N. V. Byshov, I. A. Uspensky, I. A. Yukhin [et al.]. – DOI 10.1088/1755-1315/341/1/012140 // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – № 341. – 6 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/341/1/012140> (дата обращения: 03.08.2020).

Поступила 13.01.2020; принята к публикации 20.03.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Бышов Николай Владимирович, профессор кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-8363-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4619-6446>, byshov@rgatu.ru

Успенский Иван Алексеевич, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, ivan.uspenskiy@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), доктор технических наук, доцент, Researcher ID: Q-8188-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>

Чаткин Михаил Николаевич, профессор кафедры мобильных энергетических средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А. И. Лещанкина ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), доктор технических наук, Researcher ID: O-7004-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru

Лимаренко Николай Владимирович, доцент кафедры электротехники и электроники ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), кандидат технических наук, Researcher ID: O-5342-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, limarenkodstu@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. В. Бышов, И. А. Успенский – научное руководство, постановка цели и задач исследования; И. А. Юхин, М. Н. Чаткин – поиск и анализ информационных источников, критический анализ исследования и редактирование текста; Н. В. Лимаренко – проведение исследования, создание концептуальной модели, компьютерные работы, визуализация, редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Y., Lobachevsky Y.P., Marchenko O.S, et al. Development of Innovative Machinery and Resource-Saving Technologies of Feed Production as the Basis of Livestock Breeding Development. *Vestnik FGBOU VO "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina"* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2017; (6):23-28. (In Russ.)
2. Briukhanov A., Subbotin I., Uvarov R., et al. Method of Designing of Manure Utilization Technology. *Agronomy Research*. 2017; 15(3):658-663. Available at: https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2017/05/Vol15Nr3_Briukhanov.pdf (accessed 03.08.2020). (In Eng.)
3. Pavlov P.I. Effective Mechanization Means for Manure Removal and Disposal. *Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki* = Natural and Technical Sciences. 2017; (3):87-89. (In Russ.)
4. Khmyrov V.D., Trufanov B.S., Zhuravleva O.I. Efficiency of Fertilizer Application System in Organic Agriculture. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Bulletin of Michurinsk State Agrarian University. 2019; (3):14-18. Available at: http://www.mgau.ru/sciense/journal/PDF_files/vestnik_3_2019.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
5. Eskov A.I., Lukin S.M., Merzlaya G.E. Current Status and Perspectives of Organic Fertilizers Application in Russian Agriculture. *Plodorodie* = Fertility. 2018; (1):20-23. Available at: http://plodorodie.ru/journal/2018/nomer_one/2018-1-20-23.html (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
6. Shigapov I.I., Porosyatnikov A.V., Krasnova O.N. Manure Processing Technology. *Selskiy Mekhanizator* = Rural Mechanic. 2019; (5):28-29. Available at: http://selmech.msk.ru/519.html#_Технология_переработки_навозной (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
7. Subbotin I.A., Briukhanov A.Yu., Timofeev E.V., et al. Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):366-382. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>
8. Bryuchanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev E.V., et al. Ecological and Energy Indicator of the Implementation of the Best Available Technologies for the Disposal of Poultry Manure. *Ekologiya i promyshlennost Rossii* = Ecology and Industry of Russia. 2019; 23(12):29-33. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-12-29-33>
9. Rakutko S.A. Energy and Ecological Basis of Best Available Techniques of Plant Lighting. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2019; (1):44-60. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10121>

10. Kovalev A.A., Kovalev D.A., Grigoriev V.S. Energy Efficiency of Pretreatment of Digester Synthetic Substrate in a Vortex Layer Apparatus. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(1):92-110. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202001.092-110>
11. Surzhko O.A., Kulikova M.A., Moissenko N.G., et al. Increase of Power Efficiency at Drying Bards of Food Productions. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* = Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014; 16(4):627-630. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-energeticheskoy-effektivnosti-pri-sushke-bardy-pishevyyh-proizvodstv/viewer> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
12. Goman N.V., Bobrenko I.A., Trubina N.K. The Efficiency of Using Liquid Fraction of Littered Pork Manure under Spring Wheat on Meadow and Chernozom Soil. *Vestnik KrasGAU* = the Bulletin of KrasGAU. 2018; (5):51-59. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2018_5/content/9.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
13. Kirov U.A., Batishcheva N.V., Shkrabak V.S. Efficiency Increasing of Brewing Manufacture Drains Division Into Fractions in the Hydrocyclone-Densifier. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = News of Saint-Petersburg State Agrarian University. 2018; (1):207-213. Available at: https://spbgau.ru/files/nid/6995/izvestiya_no50.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
14. Byshov D.N., Kashirin D.E., Pavlov V.V., et al. The Research of Efficiency of Purification of Wax Raw Materials in Water at Intensive Mechanical Mixing. *Vestnik KrasGAU* = Krasnoyarsk State Agrarian University Bulletin. 2017; (12):115-122. Available at: http://www.kgau.ru/vestnik/2017_12/content/19.pdf (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
15. Kulikova M.A., Kolesnikova T.A., Gribut Ye.A., et al. Estimation of Efficiency of the New Organomineral Fertilizer Based on Pig Manure. *Plodorodie*. 2019; (4):49-51. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2019.109.16>
16. Byshov N.V., Borychev S.N. Increased Efficiency of Transportation of Fruit and Vegetable Products in the Agrarian Sector. *Vestnik RGATU im. P. A. Kostycheva* = Kostychev Ryazan State Agro-technological University Bulletin. 2016; (5):38-40. (In Russ.)
17. Sychev V.G., Shevtsova L.K., Merzlaya G.Ye. Study of the Dynamics and Balance of Humus during Long-Term Application of Fertilization Systems on Main Types of Soils. *Agrokhimiya* = Agricultural Chemistry. 2018; (2):3-21. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002188118020011>
18. Shigapov I.I. Model of Biotechnical System of Process of Cleaning Up, Transportation and Processing of Manure. *Agrarnaya nauka* = Agrarian Science. 2017; (3):27-31. Available at: <https://www.vetpress.ru/jour/article/view/53> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
19. Byshov N.V., Limarenko N.V., Uspensky I.A., et al. Study of the Distribution of the Probability Density of Pathogenic Markers of Liquid Pig Manure. *Izvestiya nizhnovolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa* = News of the Lower Volga Agro-University Complex. 2019; (4):215-227. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-04-26>
20. Byshov N.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A., et al. Ecological and Technological Criteria for the Efficient Utilization of Liquid Manure. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 422. 5 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012069>
21. Limarenko N.V. The Definition of the Law of Distribution of Density of Probabilities of Specific Electrical Energy Consumption during the Disinfection of Wastewater of Agroindustrial Complex. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya* = News of Higher Schools. Food Technology. 2017; (3):108-112. Available at: <https://ivpt.kubstu.ru/tocs/356-357/31> (accessed 03.08.2020). (In Russ.)
22. Meskhi B.C., Limarenko N.V., Zharov V.P., et al. Creation of Mathematical Model for Estimating Energy Intensity of Livestock Wastes Disinfection. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Don State Technical University Bulletin. 2017; 17(4):129-135. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.23947/1992-5980-2017-17-4-129-135>
23. Inductor with Closed Movement of the Working Bodies: Patent 2668906 Russian Federation. No. 2018106113; appl. 19.02.2018; publ. 04.10.2018. 6 p.
24. Method of Disinfection of Liquids: Patent 2680073 Russian Federation. No. 2018113501; appl. 13.04.2018; publ.14.02.2019. 5 p. (In Russ.)

25. Uspensky I.A., Yukhin I.A., Borisov G.A., et al. Study of the Influence of the Inductor Bodies of the Inductor on the Power Factor. *Izvestiya nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa* = News of the Lower Volga Agro-University Complex. 2019; (3):360-369. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2019-03-45>

26. Byshov N.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A., et al. Parameters of Optimized System of Technological Process of Waste Water Disinfection of Livestock Enterprises in Integrated Physico-Chemical Effects. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 341. 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012140>

Received 13.01.2020; revised 20.03.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Nikolay V. Byshov, Professor of Chair of Machine Park Operation, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-8363-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4619-6446>; byshov@rgatu.ru

Ivan A. Uspenskiy, Head of Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, Researcher ID: B-7990-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Scopus ID: 57193743041, ivan.uspenskiy@yandex.ru

Ivan A. Yukhin, Head of Chair of Machine Park Operation, Ryazan State Agrotechnological University Named after P. A. Kostychev (1 Kostychev St., Ryazan 390044, Russia), D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: Q-8188-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>

Mikhail N. Chatkin, Professor of Leshchankin Chair of Mobile Power Tools and Agricultural Machinery, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: O-7004-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3758-7066>, chatkinm@yandex.ru

Nikolay V. Limarenko, Associate Professor of Chair of Electrical Engineering and Electronics, Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: O-5342-2017, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, limarenkodstu@yandex.ru

Contribution of the authors:

N. V. Byshov, I. A. Uspenskiy – scientific guidance, formulation of research objectives and goals; I. A. Yukhin, M. N. Chatkin – search and analysis of information sources, critical analysis of research, text editing; N. V. Limarenko – conducting research, creating a conceptual model, computer work, visualization, text editing.

All authors have read and approved the final manuscript.