

# ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ / TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT

УДК 631.862.002.8

doi: 10.15507/2658-4123.033.202304.466-489

Оригинальная статья



## Контрфактуальный анализ эффективности обеззараживания органических отходов животноводства

Я. П. Лобачевский<sup>1</sup>, А. В. Шемякин<sup>2</sup>, Н. В. Лимаренко<sup>2,3</sup>✉,  
И. А. Успенский<sup>2</sup>, И. А. Юхин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ  
(г. Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Рязанский государственный агротехнологический университет  
имени П. А. Костычева (г. Рязань, Российская Федерация)

<sup>3</sup> Донской государственный технический университет  
(г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

✉ limarenkodstu@yandex.ru

### Аннотация

**Введение.** Реализация указа президента Российской Федерации, направленного на обеспечение продовольственной безопасности страны, требует индустриализации агропромышленного комплекса. Животноводство является сектором агропромышленного комплекса, образующим наибольшее количество отходов органического происхождения, являющихся потенциальными энергоносителями: подстилочный и бесподстилочный навоз, технологические стоки и т. п. Согласно данным Росстата и результатам исследований годовой объем навоза, образуемый от хозяйств, составляет порядка 43,3–45,1 млн тонн, при этом присутствует тренд роста. Используемый энергетический потенциал от всего объема не превышает 40 %. Повысить эффективность использования энергетического потенциала органических отходов животноводства возможно путем внедрения цифровизированных решений. Стратегическим инструментом, обеспечивающим эффективную индустриализацию отрасли, является внедрение прикладных программных продуктов, обеспечивающих рост экологического и энергетического эффектов.

**Цель статьи.** Контрфактуальная оценка эффективности модели обеззараживания свиного бесподстилочного навоза в активаторе обеззараживания.

**Материалы и методы.** Контрфактуальный анализ – инструмент формализации сложных, многофакторных процессов, обеспечивающий их последующую цифровизацию. Его суть заключается в «опросе» анализируемой модели, посредством которого определяются значения варьируемых переменных, обеспечивающие изменения и приводящие к отклонению отклика за пределы граничных условий при

© Лобачевский Я. П., Шемякин А. В., Лимаренко Н. В., Успенский И. А., Юхин И. А., 2023



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

интерпретации. Преимуществом контрфактуального анализа является устойчивость и прозрачность модели к внешним воздействиям в ходе машинного обучения. Объектом исследования являлся свиной бесподстилочный навоз влажностью 88–98 %, предметом – контрфактуальный анализ зависимости числа колониеобразующих единиц общих колиформных бактерий (далее – КОЕ ОКБ) от времени экспозиции в активаторе, концентрации активного хлора, массы рабочих тел, магнитной индукции, влажности бесподстилочного навоза.

*Результаты исследования.* Результаты контрфактуальной оценки и анализа с использованием языка программирования Python и среды PyCharm 2022.2 представлены в таблицах. Контрфактуальная оценка позволила выделить диапазоны варьирования факторов, использование которых способно представлять потенциал граничных условий при решении оптимизационной задачи. Ячейки данных значений выделены серо-голубым цветом. Наиболее предпочтительные диапазоны, основанные на контрфактуальной оценке, находятся в ячейках, выделенных зелёным цветом.

*Обсуждение и заключение.* Обоснована перспективность использования активного хлора в сочетании с воздействием шаровых ферромагнитных рабочих тел как активатора обеззараживания. На основании контрфактуальной оценки установлено, что наиболее значимыми факторами, определяющими эффективность обеззараживания свиного бесподстилочного навоза по числу КОЕ ОКБ, являются: магнитная индукция в рабочей зоне индуктора активатора, концентрация активного хлора, время экспозиции.

**Ключевые слова:** цифровизация агропромышленного комплекса, прикладные цифровые продукты, контрфактуальный анализ, свиной бесподстилочный навоз, эффективность обеззараживания, активатор обеззараживания, число колониеобразующих единиц

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках Госзадания Министерства сельского хозяйства Российской Федерации на тему: «Совершенствование методов обеззараживания стоков сельскохозяйственных предприятий», номер государственного учёта в ЕГИСУ НИОКТР АААА-А16-116060910025-5.

**Для цитирования:** Контрфактуальный анализ эффективности обеззараживания органических отходов животноводства / Я. П. Лобачевский [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2023. Т. 33, № 4. С. 466–489. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.466-489>

*Original article*

## Counterfactual Analysis of the Efficiency of Decontamination of Livestock Production Organic Wastes

Ya. P. Lobachevsky<sup>a</sup>, A. V. Shemyakin<sup>b</sup>, N. V. Limarenko<sup>b,c</sup>✉,  
I. A. Uspensky<sup>b</sup>, I. A. Yukhin<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM  
(Moscow, Russian Federation)

<sup>b</sup> Ryazan State Agrotechnological University  
named after P. A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)

<sup>c</sup> Don State Technical University  
(Rostov-on-Don, Russian Federation)

✉ limarenkodstu@yandex.ru

### Abstract

*Introduction.* The implementation of the decree of the President of the Russian Federation is aimed at ensuring the food security of the country and requires the industrialization of the agro-industrial sector. The effectiveness of industrialization depends on the use

of automated, intelligent solutions at all stages of implementing technological processes. Livestock is an agro-industrial sector generating the largest amount of organic waste materials, which are potential energy carriers: litter, liquid manure, process effluents, etc. According to the data from the Russian Statistics Committee and the research results, the annual volume of manure generated from farms is from 43.3 to 45.1 million tons, while there is an upward trend. The used energy potential from the entire volume does not exceed 40%. It is possible to increase the efficiency of using the energy potential of organic animal waste materials through implementing digitalized solutions. A strategic tool for the effective industrialization of livestock is the implementation of application software products that ensure the growth of ecological and energy effects.

*Aim of the Article.* The aim of the study is a counterfactual evaluation of the efficiency of the model for decontaminating liquid pig manure in the decontamination activator.

*Materials and Methods.* Counterfactual analysis is a tool for formalizing complex, multifactorial processes to ensure their subsequent digitalization. The essence of the analysis consists in a “survey” of the analyzed model through which the values of variables are determined providing changes that lead to a deviation of the response beyond the boundary conditions during interpretation. The advantage of counterfactual analysis is the stability and transparency of the model to external influences during machine learning.

It is known that the representative pathogenic markers of the decontamination efficiency of liquid pig manure are helminth eggs and the number of colony-forming units of common coliform bacteria (CFU CCB). However, for testing and implementing an algorithm for counterfactual analysis of a mathematical model, it is acceptable to use the number of CFU CCB. The object of the study was liquid pig manure with a humidity from 88% to 98%, the subject was a counterfactual analysis of the dependence of the number of CFU CCB on the exposure time in the activator, the concentration of active chlorine, the mass of working bodies, magnetic induction, and liquid manure humidity.

*Results.* The results of counterfactual evaluation and analysis carried with the use of the Python programming language and the PyCharm 2022.2 environment are presented in the tables. The counterfactual evaluation made it possible to identify ranges of variation of factors, the use of which can represent the potential of boundary conditions in solving the optimization problem. The cells of these values are highlighted in grey-blue. The most preferred ranges based on counterfactual evaluation are in the cells highlighted in green.

*Discussion and Conclusions.* There has been substantiated the prospects of using active chlorine in combination with the influence of ferromagnetic working bodies moving in an alternating rotating electromagnetic field as a decontamination activator. On the basis of counterfactual evaluation it was established that the most significant factors for determining the efficiency of decontamination of liquid pig manure by the number of CFU CCB are: magnetic induction in the working zone of the activator inductor, active chlorine concentration and exposure time.

**Keywords:** digitalization of the agro-industrial complex, applied digital products, counterfactual analysis, pig manure, disinfection efficiency, disinfection activator, number of colony-forming units

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

**Funding:** The study was carried out within the framework of the State Task of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation on the topic Counterfactual Analysis of the Efficiency of Decontamination of Organic Wastes from Livestock Production, State Registration Number in the USRSC R&D AAAA-A16-116060910025-5.

**For citation:** Lobachevsky Ya.P., Shemyakin A.V., Limarenko N.V., Uspensky I.A., Yukhin I.A. Counterfactual Analysis of the Efficiency of Decontamination of Livestock Production Organic Wastes. *Engineering Technologies and Systems*. 2023;33(4):466–489. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.033.202304.466-489>

## Введение

Согласно данным Организации Объединенных Наций, в мире ежегодно образуется более 1 млрд т продовольственных и сельскохозяйственных органических отходов. Это связано с технологическими процессами животноводства,

составляющими которых являются подстилочный и бесподстилочный навоз, технологические стоки, отходы кормления и другие продукты жизнедеятельности животных. В настоящее время энергетический потенциал данных органических систем используется не более чем на 35–40 %. Оставшиеся объемы представляют собой серьезную нагрузку на окружающие экосистемы. В Российской Федерации, согласно данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), а также статистическим данным Росстата за 2020–2022 гг., в агропромышленном комплексе образовалось порядка 150 млн т отходов. Усредненное ежегодное значение составляет порядка 45–47 млн т, из которых 95–97 % приходится на навоз и его отдельные разновидности, в том числе помет, подстилку и прочее. К сожалению, используемые технические решения по утилизации данного вида отходов не обеспечивают должной интенсивности, что приводит к недостаточному использованию потенциала органических отходов животноводства как потенциального энергоносителя. Отсутствие экологически безопасных и энергетически эффективных решений по интенсивному обеззараживанию органических отходов животноводства приводит к его внесению в почвы с высоким содержанием патогенных элементов, что увеличивает площадь эродированных земель. Ежегодный экономический убыток, связанный с данной проблемой, составляет порядка 25 млрд руб. Согласно отчету Минсельхоза России за 2019 год, объем производства свинины в России составил более 5,8 млн т, что является рекордным показателем за последние 30 лет. В 2020–2022 гг. данный показатель сохранялся на прежнем уровне. Известно, что обеспечить данный объем производства возможно использованием индустриального подхода к животноводству. Индустриализация животноводства требует бесподстилочного содержания свиней, а также высокопроизводительных и технологически эффективных технических решений по удалению и обеззараживанию жидких отходов. Доказано [1–9], что обеспечение обеззараживания свиного бесподстилочного навоза без совместного использования специфических цифровых инструментов на сегодняшний день затруднительно. Так, разработка цифровых решений, дополняющих используемые технические решения обеззараживания свиного бесподстилочного навоза, является актуальной задачей для науки, практическая составляющая которой позволит повысить экологическую безопасность и энергетическую эффективность.

Кроме значительной энергоемкости процесс обеззараживания и подготовки к нему свиного бесподстилочного навоза обладает высокой длительностью. В зависимости от климатических условий обеззараживание и подготовка к нему могут продолжаться от 6 до 9 месяцев, что приводит к значительным экономическим и экологическим убыткам. Интенсифицировать данный процесс возможно путем использования активаторов. Наиболее распространенными являются химические, физические и физико-химические. К химическим активаторам относят воздействия бактерицидными реагентами, к физическим – волновые воздействия механическими колебаниями на частоте ультразвука, а также воздействия электромагнитным полем с перемещающимися в нем ферромагнитными телами различной формы. Установлено [10–15], что использование физических и химических активаторов в комплексе, контролируемом цифровыми системами, является наиболее приоритетным направлением интенсификации обеззараживания свиного бесподстилочного навоза и органических отходов животноводства в целом.

Целью исследования является контрфактуальная оценка эффективности модели обеззараживания свиного бесподстилочного навоза в активаторе обеззараживания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– обосновать наиболее перспективный активатор обеззараживания свиного бесподстилочного навоза;

– определить наиболее значимые факторы эффективности обеззараживания свиного бесподстилочного навоза и модель, формализующую их;

– провести контрфактуальный анализ полученной модели.

Объект исследования – свиной бесподстилочный навоз влажностью 88–98 %, предмет – контрфактуальный анализ зависимости числа КОЕ ОКБ от времени экспозиции в активаторе, концентрации активного хлора, массы рабочих тел, магнитной индукции, влажности бесподстилочного навоза.

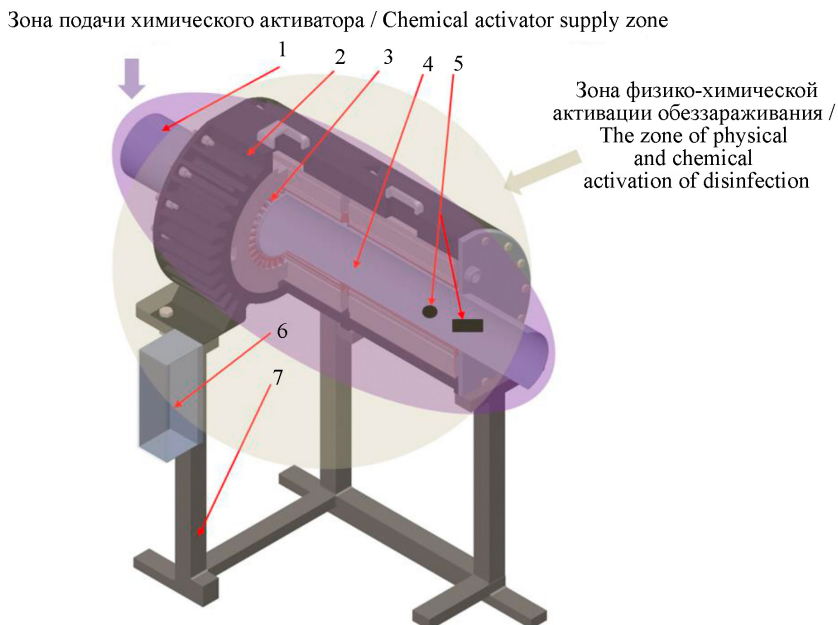
### Обзор литературы

Обеззараживание – комплекс мероприятий, направленный на подавление патогенной составляющей обрабатываемой среды. Согласно исследованию В. Г. Тюрина, обеззараживание включает: дезинсекцию, дератизацию, дегазацию, дезактивацию, дезинфекцию [14]. Наиболее приоритетной составляющей описанного комплекса мероприятий в вопросе энергетически эффективного и экологически безопасного обеззараживания органических отходов являются эффекты, обеспечиваемые дезинфекцией. На основании проведенного анализа [11–24], а также результатов собственных исследований [24–26], сформулированы следующие требования к данной операции: устойчивый пролонгированный бактерицидный эффект, а также минимальное количество отрицательных побочных продуктов. К отрицательным побочным продуктам зачастую относят образование следующих элементов: тригалометанов, броматов, хлоратов, хлоритов, альдегидов, кетонов, органических кислот, бромсодержащих тригалометанов, броматов (в присутствии бромидов), пероксидов, бромуксусной кислоты и т. п.<sup>1</sup> Образование данных элементов приводит к необходимости внедрения дополнительных операций, направленных на их сепарацию, удаление и энергетически эффективную утилизацию. Установлено [24; 26], что наиболее рациональным вариантом обеззараживания органических отходов животноводства является использование комбинированных физико-химических воздействий. Доказана эффективность использования хлорсодержащих реагентов, среди которых хлорная известь  $\text{Ca}(\text{Cl})\text{OCl}$ , гипохлорит натрия  $\text{NaClO}$ , диоксид хлора  $\text{ClO}_2$ , хлорамин  $\text{NH}_2\text{Cl}$  [13; 14; 19; 22]. Обобщенно механизм подавления активности патогенных форм с использованием описанных реагентов можно представить следующим образом: хлорноватистая кислота взаимодействует с гипохлорит ионами протоплазмы, находящимися в органических отходах, что вызывает течение окислительного процесса с последующей деградацией и лизисом жизненно важных путей патогенов. Отмечен положительный опыт обеззараживания с использованием наночастиц серебра [27; 28]. В отличие от традиционного бактериостатического подавления активности патогенов олигодинамическими реагентами, использование наночастиц серебра позволяет проникать в протоплазму и цитоплазму клеток, что приводит к их естественному лизису. Существенными преимуществами использования химических составляющих при обеззараживании органических

<sup>1</sup> Лимаренко Н. В. Повышение эффективности обеззараживания бесподстилочного навоза : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.20.01. Рязань, 2022. 397 с.

отходов животноводства является обеспечение устойчивого пролонгированного бактерицидного эффекта, эффективность против большинства психрофильных и мезофильных патогенных форм.

На основании проведенных экспериментальных исследований, методик и результатов, которые подробно описаны в исследовании ряда авторов, доказано, что наиболее перспективным способом обеззараживания органически отходов животноводства является использование воздействий, сочетающих физические и химические эффекты<sup>1</sup> [29]. Одной из систем, позволяющих реализовать данные требования, являются электромагнитные активаторы. Общий вид активатора в разрезе представлен ниже (рис. 1).



Р и с. 1. Общий вид активатора обеззараживания в разрезе:  
1 – труба рабочей зоны; 2 – корпус; 3 – индуктор; 4 – пространство рабочей зоны;  
5 – стержневые или шаровые рабочие ферромагнитные тела; 6 – шкаф управления;  
7 – станина устройства

F i g. 1. General view of the decontamination activator in the section:  
1 – working area pipe; 2 – housing; 3 – inductor; 4 – working area space;  
5 – rod or ball working ferromagnetic bodies; 6 – control cabinet; 7 – the device frame

Опыт использования данных систем в смежных областях описан в работах П. И. Гриднева, Д. А. Ковалева и др. [30–34]. Электромагнитный активатор представляет собой индуктор, создающий вращающееся переменное электромагнитное поле, рабочая зона которого является открытым цилиндром, находящимся в расточке индуктора с перемещающимися внутри ферромагнитными телами. Согласно исследованиям [35; 36], геометрия, масса рабочих тел и уровень заполненности ими рабочей зоны электромагнитного активатора оказывают значительное влияние на эффективность реализуемых процессов. В данном случае под эффективностью понимается соотношение уровня энергетических затрат к совокупности

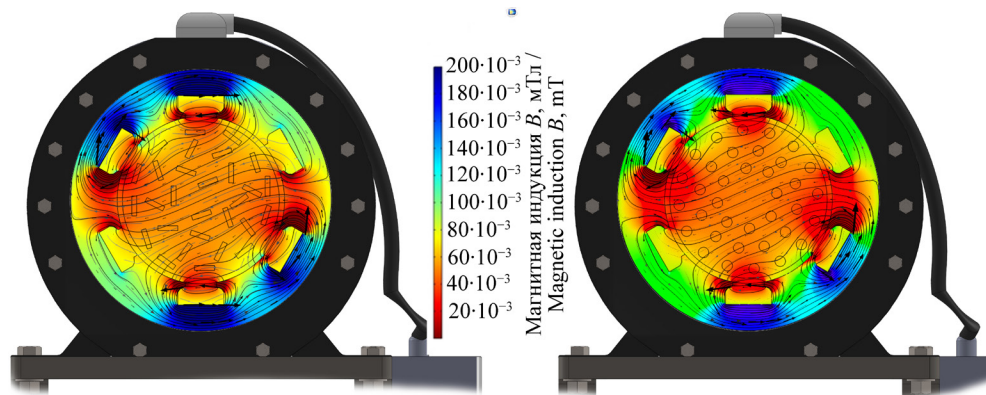
количественных показателей, определяющих качество. Установлено, что данное физическое воздействие значительно интенсифицирует химические реакции. Положительной составляющей данного эффекта является получение безопасного с санитарно-эпидемиологической точки зрения продукта за меньший промежуток времени и с наименьшими энергозатрами.

Из анализа рисунка 1 видно, что зона подачи химического активатора обеззараживания располагается непосредственно перед воздействием индуктора. Подача химического активатора осуществляется путём массового дозирования в трубу рабочей зоны. Методика приготовления химического активатора и их типы подробно описаны в работах [25; 29]. Согласно следующим проанализированным источникам [22; 24; 29], наиболее предпочтительным химическим активатором обеззараживания бесподстилочного навоза является активный хлор, положительный опыт использования которого описан в нескольких рассмотренных нами работах [14–18; 29]. Отличительным признаком использования данного химического активатора является его сниженная концентрация, обусловленная последующей интенсификацией. Данный способ обеззараживания бесподстилочного навоза защищен патентом Российской Федерации на изобретение № 2723609.

Бесподстилочный навоз совместно с химическим активатором далее подается в технологическое пространство рабочей зоны, в котором происходит воздействие вращающегося переменного магнитного поля промышленной частоты и перемещающихся в нем ферромагнитных тел. Результаты сопоставления данных имитационного моделирования влияния массы и геометрии рабочих тел на его энергетические характеристики в среде Comsol Multiphysics представлены на рисунке 2. Согласно данным исследований [32–36], геометрия и масса используемых рабочих тел оказывают значительное влияние на эффективность обеззараживания. Доказано [34; 35], что наиболее рациональным является использование стержневой и шаровой формы рабочих тел. С целью проверки приведенных данных было принято решение провести исследование [35], суть которого заключалась в имитационном моделировании влияния массы и геометрии ферромагнитных тел, перемещающихся во вращающемся переменном магнитном поле индуктора, на энергетические характеристики: активную, реактивную, полную мощности, уровень магнитной индукции. Моделирование осуществлялось на основании результатов исследований [36]. Методика, условия, параметры моделирования описаны в работе А. А. Лаврентьева и др. [35].

Анализ результатов, представленных на рисунке 2, позволил сделать следующие выводы: при минимальной массе ферромагнитных стержневых рабочих тел уровень магнитной индукции составляет  $B \approx 38\text{--}40$  мТл, при максимальной  $B \approx 54\text{--}57$  мТл, при минимальной массе шаровых ферромагнитных рабочих тел  $B \approx 50$  мТл, при максимальной  $B \approx 68\text{--}72$  мТл [35]. Был сделан вывод о наибольшей перспективности использования шаровых ферромагнитных рабочих тел в качестве физического активатора.

Проведённый анализ источников позволил выделить наиболее существенные факторы, оказывающие влияние на эффективность активации обеззараживания бесподстилочного навоза физико-химическим воздействием. К ним относятся: концентрация химического активатора, масса шаровых ферромагнитных рабочих тел, магнитная индукция в рабочей зоне индуктора, влажность бесподстилочного навоза и время экспозиции материала с активатором.



Р и с. 2. Сопоставление результатов моделирования влияния массы и геометрии ферромагнитных рабочих тел на энергетические характеристики активатора в среде Comsol Multiphysics

Fig. 2. Comparison of simulation results of the influence of the mass and geometry of ferromagnetic working bodies on the energy characteristics of the activator in the Comsol Multiphysics environment

После определения конструктивно-технологических параметров активатора обеззараживания бесподстильного навоза необходимо выбрать наиболее представительные маркеры, определяющие эффективность процесса. Анализ информационных источников [18; 21; 23], результатов испытаний [25; 29], а также нормативных документов позволил с достаточной степенью достоверности принять в качестве данного маркера число КОЕ ОКБ. Известно, что общие колиформные бактерии включают в себя следующие виды микроорганизмов: *Escherichia coli* (*E. coli*), *Enterobacter spp.*, *Klebsiella spp.*, *Citrobacter spp.* Это граммотрицательные бактерии, присутствующие в кишечнике животных и человека, они являются представительным маркером фекального загрязнения среды [24; 26; 29]. Известно, что концентрация ОКБ в бесподстильном навозе в значительной мере варьируется в зависимости от вида животных, рациона их питания, условий и формы содержания. Однако концентрация ОКБ в свежем бесподстильном навозе составляет не менее  $10\text{--}30 \cdot 10^6$  колоний на грамм, что делает их информативным маркером эффективности обеззараживания.

### Материалы и методы

После обоснования наиболее перспективного активатора обеззараживания, выбора маркера, определяющего эффективность воздействия, на основании исследований сформулируем диапазоны варьирования наиболее значимых факторов. Диапазоны варьирования факторов, входящих в анализируемую модель, представлены в таблице 1.

Так как физико-химическая активация процесса обеззараживания бесподстильного навоза физико-химическим воздействием является многофакторной задачей, вклад в которую вносят не только отдельные оценки коэффициентов описанных факторов, но и их парные взаимодействия, в качестве модели, формализующей их связь, была выбрана следующая зависимость:

$$\bar{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} (x_i^2 - \beta). \quad (1)$$



Т а б л и ц а 1  
T a b l e 1

**Факторы, входящие в анализируемую модель, и уровни их варьирования**  
**Factors included in the analyzed model and the levels of their variation**

№	Факторы / Factors	Об. / Des.	Ниж. / Low	Нул. / Middle	Вер. / High
1	Концентрация активного хлора $\omega$ в мг/л / Concentration of active chlorine $\omega$ in mg/l	$x_1$	10	13	16
2	Масса шаровых ферромагнитных рабочих тел $m$ , гр. / Mass of spherical ferromagnetic working bodies $m$ , gr.	$x_2$	600	1 000	1 400
3	Магнитная индукция $B$ в мТл / Magnetic induction $B$ , mTl	$x_3$	40	60	80
4	Влажность бесподстилочного навоза $W$ , % / Humidity of liquid manure $W$ , %	$x_4$	88	93	98
5	Время экспозиции активатора $t$ в с / Activator exposure time $t$ , s	$x_5$	6	9	12

Оценка адекватности полученной модели осуществлялась в соответствии со стандартной методикой, реализованной в программном пакете Statistica. Кроме пакета Statistica также возможно использование программы Matlab, технологии библиотек Pandas, Matplotlib в среде языка программирования Python. Алгоритм оценки адекватности подобных моделей подробно описан в исследованиях [29]. Фундаментальные основы оценки адекватности статистических моделей как исходных данных для проведения контрфактуального анализа описаны в рассмотренных нами работах<sup>2</sup>. В ходе анализа описанных информационных источников наиболее значимыми критериями оценки адекватности статистической модели как исходных данных для контрфактуального анализа является определение соотношений расчетных и критических значений критериев Стьюдента и Фишера. Расчетное значение критерия Фишера определяется отношением дисперсии адекватности к дисперсии воспроизводимости:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{восп}^2} = \frac{\frac{1}{N-L} \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y}_j)^2}{\frac{1}{n_0-1} \sum_{i=1}^{n_0} (y_{oi} - \bar{y}_0)^2}, \quad (2)$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности;  $S_{восп}^2$  – дисперсия воспроизводимости;  $N$  – общее число опытов;  $L$  – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии;  $y_j$  – экспериментальные значения отклика;  $\bar{y}_j$  – значения отклика, рассчитанные по уравнению регрессии;  $n_0$  – число опытов в центре плана;  $\bar{y}_0$  – среднее значение отклика в центре плана.

После обоснования выбора модели, наиболее достоверно формализующей исследуемые зависимости, были проведены экспериментальные исследования, методика которых описана в нескольких рассмотренных нами источниках [29; 37].

В результате была получена математическая модель зависимости числа КОЕ ОКБ от варьируемых факторов при обеззараживании комплексным физико-химическим воздействием в активаторе:

<sup>2</sup> Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : уч. пособие для вузов. М. : Высш. шк., 2003. 479 с.; Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгдел К. Оптимизация в технике. В 2-х кн. Кн. 1. М. : Мир, 1986. 349 с.

$$y_1 = 85,04 - 7,86x_3^2 - 5,97x_5^2 + 10,26x_1 + 10,35x_2 - 15,30x_4 + 13,38x_5 - \\ - 7,90x_1x_2 - 7,90x_1x_3 - 8,10x_1x_4 - 6,65x_1x_5 - 7,90x_2x_3 - 8,10x_2x_4 - \\ - 6,65x_2x_5 - 8,10x_3x_4 - 6,65x_3x_5 - 9,35x_4x_5, \quad (3)$$

где  $x_1$  – концентрация активного хлора  $\omega$  в мг/л;  $x_2$  – масса шаровых ферромагнитных рабочих тел  $m$ , гр;  $x_3$  – уровень магнитной индукции в рабочей зоне  $B$ , мТл;  $x_4$  – влажность бесподстилочного навоза  $W$ , %;  $x_5$  – время экспозиции активатора  $t$  в с.

Критическое значение критерия Стьюдента – 4,303, уровень значимости  $\alpha = 0,05$ , число степеней свободы – 2. Расчётное значение критерия Фишера –  $F_p = 4,195$ , критическое значение критерия Фишера –  $F_{кр} = 5,87$ . Поскольку  $F_p < F_{кр}$ , модель (3) является адекватной.

Осуществив необходимые проверки модели (3) и убедившись в ее адекватности с математической точки зрения, используя известные преобразования осуществим переход от кодированного представления к натуральному для дальнейшего удобства исследования.

Раскодирование модели является важным этапом для ее последующего контрфактуального анализа, так как оно позволяет сделать его наиболее приемлемым с математической точки зрения. Обобщенно процесс раскодирования модели (3) представим следующим образом:

$$y_1 = 85,04 - 7,86 \cdot \frac{x_3^2 - 60}{20} - 5,97 \cdot \frac{x_5^2 - 9}{3} + 10,26 \cdot \frac{x_1 - 13}{3} + 10,35 \cdot \frac{x_2 - 1000}{400} - \\ - 15,30 \cdot \frac{x_4 - 93}{5} + 13,38 \cdot \frac{x_5 - 9}{3} - \frac{7,90}{3 \cdot 400} (x_1 - (-13))(x_2 - (-1000)) + \\ + \frac{7,90}{3 \cdot 20} (x_1 - (-13))(x_3 - (-60)) - \frac{8,10}{3 \cdot 5} (x_1 - (-13))(x_4 - (-93)) - \\ - \frac{6,65}{3 \cdot 3} (x_1 - (-13))(x_5 - (-9)) - \frac{7,90}{400 \cdot 20} (x_2 - (-1000))(x_3 - (-60)) - \\ - \frac{8,10}{400 \cdot 5} (x_2 - (-1000))(x_4 - (-93)) - \frac{6,65}{400 \cdot 3} (x_2 - (-1000))(x_5 - (-9)) - \\ - \frac{8,10}{20 \cdot 5} (x_3 - (-60))(x_4 - (-93)) - \frac{6,65}{20 \cdot 3} (x_3 - (-60))(x_5 - (-9)) - \\ - \frac{9,35}{5 \cdot 3} (x_4 - (-93))(x_5 - (-9)). \quad (4)$$

После раскодирования модель (3) примет следующий вид:

$$KOE OKB = -2881,4133 - 0,0197B^2 - 0,6633t^2 + 74,7733\omega + 0,5972m - \\ - 24,6000W + 96,1672t - 0,0006\omega m - 0,1300\omega B - 0,5400\omega W - 0,74\omega t - \\ - 0,0010mB - 0,0041mW - 0,0055mt - 0,0810BW - 0,1108Bt - 0,6233Wt. \quad (5)$$

После получения исходных данных, осуществим контрфактуальный анализ модели (5). Рассмотрим его основные составляющие. Контрфактуальный анализ (или анализ контрфактуальных ситуаций) – метод исследования, позволяющий оценить

последствия различных решений, событий или действий, которые могли бы произойти, если бы были изменены определенные факторы или условия. Суть анализа заключается в создании «контрфактуальных» сценариев, которые предполагают изменение определенных факторов или условий в прошлом или в будущем, чтобы определить, какие были бы последствия для системы. Данный метод рационально использовать при оценке достоверности математических моделей, являющихся исходными данными для построения интеллектуализированных систем принятия решений. В работах зарубежных ученых [38–40] отмечен положительный опыт использования данной методологии в задачах оценки эффективности различных политических, экономических, социальных или технологических решений. Контрфактуальный анализ позволяет оценить, какие факторы являются ключевыми для определенного явления или системы, какие изменения в этих факторах могут привести к определенным результатам, что позволяет определить оптимизационный потенциал системы и его конкретные количественные границы. В качестве инструмента реализации контрфактуального анализа был выбран язык программирования Python, в качестве среды – PyCharm 2022.2. С помощью описанных инструментов был реализован скрипт, позволяющий провести контрфактуальный анализ нелинейных регрессионных моделей.

**Результаты исследования**

Результаты контрфактуального анализа с использованием описанных инструментов представлены в таблицах 2, 9. В таблице 2 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях: концентрация активного хлора 4–11 мг/литр в зависимости от времени экспозиции навоза в активаторе от 2 до 18 секунд. Анализ представленных данных позволит сделать вывод об отсутствии целесообразности использования приведенных диапазонов при обеззараживании навоза, так как полученные значения числа КОЕ ОКБ не соответствуют предъявляемым к нему санитарно-эпидемиологическим требованиям.

Таблица 2

Table 2

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях: концентрация активного хлора 4–11 мг/литр. Время экспозиции активатора**  
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions: concentration of active chlorine is 4–11 mg/liter. Activator exposure time**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs	Концентрация активного хлора $\omega$ , мг/л / Concentration of active chlorine $\omega$ in mg/l							
	4	5	6	7	8	9	10	11
2	227	222	217	212	208	203	198	193
3	222	217	212	208	203	198	193	189
4	217	212	208	203	198	193	189	184
5	212	208	203	198	193	189	184	179
6	208	203	198	193	189	184	179	174
7	203	198	193	189	184	179	174	170
8	198	193	189	184	179	174	170	165
9	193	189	184	179	174	170	165	160
10	189	184	179	174	170	165	160	155
11	184	179	174	170	165	160	155	151
12	179	174	170	165	160	155	151	146
13	174	170	165	160	155	151	146	141
14	170	165	160	155	151	146	141	137
15	165	160	155	151	146	141	137	132
16	160	155	151	146	141	137	132	127
17	155	151	146	141	137	132	127	122
18	151	146	141	137	132	127	122	118

Время экспозиции активатора  $t$ , с /  
Activator exposure time  $t$ , s

В таблице 3 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях концентрации активного хлора 12–19 мг/л в зависимости от времени экспозиции навоза в активаторе от 2 до 18 секунд. Анализ данных, представленных в таблице 3, позволит сделать вывод о том, что наибольший экологический эффект с точки зрения санитарно-эпидемиологических требований, предъявляемых к навозу и определяющих его безопасность, дают: концентрация активного хлора 19 мг/л при времени экспозиции 14 секунд, концентрация активного хлора от 17 до 18 мг/л при времени экспозиции 15 секунд, концентрация активного хлора от 16 до 19 мг/л при времени экспозиции 16 секунд, концентрация активного хлора от 15 до 19 мг/л при времени экспозиции 17 секунд, концентрация активного хлора от 14 до 19 мг/л при времени экспозиции 18 секунд. Приведенные значения обеспечивают число КОЕ ОКБ, не превышающее 100 шт., что является предпочтительным с точки зрения требований Методических указаний 2.1.5.3692-21. Описанные значения выделены зеленым цветом ячеек таблицы 3. Кроме наиболее предпочтительных сочетаний диапазонов факторов, обеспечивающих реализацию предъявляемых требований, алгоритм контрфактуального анализа позволяет выделить диапазоны, использование которых способно представлять потенциал граничных условий при решении оптимизационной задачи. Ячейки данных значений выделены серо-голубым цветом. Принцип выбора алгоритмом данных значений основан на оценке весовой значимости коэффициентов модели (5). На текущий момент значимость весовых коэффициентов уравнения интерпретирует исследователь. Для оценки адекватности диапазонов оптимизационного потенциала исследуемой модели (5) и подтверждения или опровержения выдвинутой гипотезы необходимо проведение дополнительных исследований, что является отдельной задачей и не входит в алгоритм контрфактуального анализа.

Таблица 3

Table 3

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:  
концентрация активного хлора 12–19 мг/литр. Время экспозиции активатора**  
**Results of the counterfactual analysis of the model under the following conditions:  
concentration of active chlorine is 12–19 mg/liter. Activator exposure time**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU ОКБ, pcs.	Концентрация активного хлора $\omega$ , мг/л / Concentration of active chlorine $\omega$ in mg/l									
	12	13	14	15	16	17	18	19		
Время экспозиции активатора $t$ , с / Activator exposure time $t$ , s	2	189	184	179	174	170	165	160	155	
	3	184	179	174	170	165	160	155	151	
	4	179	174	170	165	160	155	151	146	
	5	174	170	165	160	155	151	146	141	
	6	170	165	160	155	151	146	141	137	
	7	165	160	155	151	146	141	137	132	
	8	160	155	151	146	141	137	132	127	
	9	155	151	146	141	137	132	127	122	
	10	151	146	141	137	132	127	122	118	
	11	146	141	137	132	127	122	118	113	
	12	141	137	132	127	122	118	113	108	
	13	137	132	127	122	118	113	108	103	
	14	132	127	122	118	113	108	103	99	
	15	127	122	118	113	108	103	99	94	
	16	122	118	113	108	103	99	94	89	
	17	118	113	108	103	99	94	89	84	
	18	113	108	103	99	94	89	84	80	

В таблицах 4 и 5 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях изменения массы шаровых ферромагнитных рабочих тел в диапазоне от 300 до 1 800 гр. в зависимости от времени экспозиции навоза в активаторе от 2 до 18 секунд. Анализ данных, представленных в таблицах 4 и 5, позволит сделать вывод об отсутствии прямого влияния данного фактора на число КОЕ ОКБ. Масса рабочих тел является сопутствующим фактором, оказывающим влияние на интенсивность активации обеззараживания навоза, следовательно его действие проявляется при межфакторном взаимодействии, что подтверждается наличием соответствующих оценок коэффициентов в модели (5).

Таблица 4  
Table 4

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:  
масса рабочих тел 300–1000 г. Время экспозиции активатора**  
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:  
Mass of working bodies 300–1000 g. Exposure time of the activator**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.	Масса рабочих тел $m$ , гр. / Mass of spherical ferromagnetic working bodies $m$ , gr.							
	300	400	500	600	700	800	900	1000
2	522	515	508	500	493	485	478	471
3	520	512	505	497	490	483	475	468
4	517	509	502	495	487	480	472	465
5	514	507	499	492	485	477	470	462
6	511	504	497	489	482	474	467	460
7	509	501	494	486	479	472	464	457
8	506	498	491	484	476	469	461	454
9	503	496	488	481	474	466	459	451
10	500	493	486	478	471	463	456	449
11	498	490	483	475	468	461	453	446
12	495	488	480	473	465	458	451	443
13	492	485	477	470	463	455	448	440
14	489	482	475	467	460	452	445	438
15	487	479	472	465	457	450	442	435
16	484	477	469	462	454	447	440	432
17	481	474	466	459	452	444	437	429
18	478	471	464	456	449	441	434	427

В таблицах 6 и 7 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях изменения уровня магнитной индукции, создаваемой индуктором в рабочей зоне активатора в диапазоне от 25 до 100 мТл в зависимости от времени экспозиции навоза в активаторе от 2 до 18 сек. Как показал анализ полученных результатов, обеспечение требований санитарно-эпидемиологической безопасности, предъявляемых к навозу, начинает выполняться при значениях магнитной индукции от 55 мТл и времени экспозиции 18 с.

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:  
масса рабочих тел 1100–2000 гр. Время экспозиции активатора**  
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:  
Mass of working bodies 1100–2000 gr. Exposure time of the activator**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.	Масса рабочих тел $m$ , гр. / Mass of spherical ferromagnetic working bodies $m$ , gr.							
	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800
2	463	456	448	441	434	426	419	411
3	460	453	446	438	431	423	416	409
4	458	450	443	435	428	421	413	406
5	455	448	440	433	425	418	411	403
6	452	445	437	430	423	415	408	400
7	449	442	435	427	420	412	405	398
8	447	439	432	424	417	410	402	395
9	444	437	429	422	414	407	400	392
10	441	434	426	419	412	404	397	389
11	438	431	424	416	409	401	394	387
12	436	428	421	414	406	399	391	384
13	433	426	418	411	403	396	389	381
14	430	423	415	408	401	393	386	378
15	428	420	413	405	398	391	383	376
16	425	417	410	403	395	388	380	373
17	422	415	407	400	392	385	378	370
18	419	412	404	397	390	382	375	367

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:  
уровень магнитной индукции 25–60 мТл. Время экспозиции активатора**  
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:  
magnetic induction level 25–60 mT. Activator exposure time**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.	Магнитная индукция $B$ в мТл / Magnetic induction $B$ , mT							
	25	30	35	40	45	50	55	60
2	198	189	180	171	163	154	145	137
3	195	186	177	168	160	151	142	134
4	192	183	174	166	157	148	139	131
5	189	180	171	163	154	145	136	128
6	186	177	168	160	151	142	133	125
7	183	174	165	157	148	139	131	122
8	180	171	162	154	145	136	128	119
9	177	168	159	151	142	133	125	116
10	174	165	156	148	139	130	122	113
11	171	162	153	145	136	127	119	110
12	168	159	150	142	133	124	116	107
13	165	156	147	139	130	121	113	104
14	162	153	145	136	127	118	110	101
15	159	150	142	133	124	115	107	98
16	156	147	139	130	121	112	104	95
17	153	144	136	127	118	110	101	92
18	150	141	133	124	115	107	98	89

Т а б л и ц а 7  
T a b l e 7

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:  
уровень магнитной индукции 65–110 мТл. Время экспозиции активатора**  
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:  
Magnetic induction level 65–110 mT. Activator exposure time**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.	Магнитная индукция $B$ в мТл / Magnetic induction $B$ , mT							
	65	70	75	80	85	90	95	100
2	128	119	111	102	93	84	76	67
3	125	116	108	99	90	81	73	64
4	122	113	105	96	87	79	70	61
5	119	110	102	93	84	76	67	58
6	116	107	99	90	81	73	64	55
7	113	104	96	87	78	70	61	52
8	110	101	93	84	75	67	58	49
9	107	98	90	81	72	64	55	46
10	104	96	87	78	69	61	52	43
11	101	93	84	75	66	58	49	40
12	98	90	81	72	63	55	46	37
13	95	87	78	69	60	52	43	34
14	92	84	75	66	58	49	40	31
15	89	81	72	63	55	46	37	28
16	86	78	69	60	52	43	34	25
17	83	75	66	57	49	40	31	23
18	80	72	63	54	46	37	28	20

Время экспозиции активатора  $t$ , с /  
Activator exposure time  $t$ , s

Исходя из результатов предварительно проведенных исследований [35–37], можно сделать вывод о том, что уровень энергозатрат при данной продолжительности будет непропорционален санитарно-эпидемиологическому эффекту. Наибольшее санитарно-эпидемиологическое соответствие числа КОЕ ОКБ наблюдается при значениях магнитной индукции от 65 мТл и времени экспозиции 12 сек., при увеличении магнитной индукции до 70 мТл время экспозиции составляет от 9 сек., при 75 мТл – от 6 сек., а при 85–100 мТл – от 2 сек. Кроме полученных данных в таблицах 6 и 7 выделены серо-голубым цветом ячейки, представляющие собой потенциал диапазона варьирования при решении оптимизационной задачи. Уровень магнитной индукции в данных ячейках составляет от 50 до 80 мТл при времени экспозиции от 18 до 2 сек.

На основании изложенного, проведенных ранее исследований [35–37] и анализа весовых оценок коэффициентов модели (5) можно сделать вывод о том, что магнитная индукция является значимым фактором, определяющим интенсивность активации навоза. Контрфактуальный анализ показал, что существенное влияние на нее оказывают парные межфакторные взаимодействия.

В таблицах 8 и 9 представлены результаты контрфактуального анализа модели (5) в условиях изменения влажности бесподстилочного навоза в диапазоне от 86 до 99 % в зависимости от времени его экспозиции от 2 до 18 секунд. Анализ данных, позволит сделать вывод об отсутствии прямого влияния данного фактора на число КОЕ ОКБ. Влияние влажности бесподстилочного навоза и времени экспозиции в диапазоне от 2 до 18 сек. на число КОЕ ОКБ без учета межфакторных взаимодействий является недостаточно корректным [37].

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:  
влажности бесподстилочного навоза 86–91 %. Время экспозиции активатора**  
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:  
humidity of liquid manure 86–91 %. Exposure time of the activator**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU CCB, pcs.	Влажность бесподстилочного навоза $W$ , % / Humidity of liquid manure $W$ , %						
	86	87	88	89	90	91	
Время экспозиции активатора $t$ , с / Activator exposure time $t$ , s	2	225	224	224	223	222	222
	3	225	224	224	223	222	221
	4	225	224	224	223	222	221
	5	225	224	224	223	222	221
	6	225	224	223	223	222	221
	7	225	224	223	223	222	221
	8	225	224	223	223	222	221
	9	225	224	223	223	222	221
	10	225	224	223	222	222	221
	11	225	224	223	222	222	221
	12	225	224	223	222	222	221
	13	224	224	223	222	221	221
	14	224	224	223	222	221	221
	15	224	224	223	222	221	221
	16	224	224	223	222	221	221
	17	224	223	223	222	221	220
	18	224	223	223	222	221	220

**Результаты контрфактуального анализа модели в условиях:  
влажности бесподстилочного навоза 92–99 %. Время экспозиции активатора**  
**Results of counterfactual analysis of the model under the following conditions:  
humidity of liquid manure 92–99 %. Exposure time of the activator**

Число КОЕ ОКБ, шт. / Number of CFU ОКВ, pcs.	Влажность бесподстилочного навоза $W$ , % / Humidity of liquid manure $W$ , %								
	92	93	94	95	96	97	98	99	
Время экспозиции активатора $t$ , с / Activator exposure time $t$ , s	2	221	220	219	219	218	217	216	216
	3	221	220	219	218	218	217	216	216
	4	221	220	219	218	218	217	216	215
	5	221	220	219	218	218	217	216	215
	6	221	220	219	218	218	217	216	215
	7	220	220	219	218	217	217	216	215
	8	220	220	219	218	217	217	216	215
	9	220	220	219	218	217	217	216	215
	10	220	219	219	218	217	217	216	215
	11	220	219	219	218	217	216	216	215
	12	220	219	219	218	217	216	216	215
	13	220	219	219	218	217	216	216	215
	14	220	219	218	218	217	216	216	215
	15	220	219	218	218	217	216	215	215
	16	220	219	218	218	217	216	215	215
	17	220	219	218	218	217	216	215	215
	18	220	219	218	217	217	216	215	214



### Обсуждение и заключение

Таким образом, использование контрфактуального анализа позволяет с минимальными энергозатратами определить направление дальнейшего уточнения математической модели, а также ее потенциал при решении оптимизационной задачи. Результатом контрфактуального анализа является расширение области интереса варьируемого фактора и понимания тесноты его парных взаимодействий.

В результате оценки эффективности обеззараживания свиного бесподстилочного навоза по числу КОЕ ОКБ методом контрфактуального анализа получены следующие результаты:

– обоснована перспективность использования активного хлора в сочетании с воздействием шаровых ферромагнитных рабочих тел, перемещающихся в переменном вращающемся электромагнитном поле;

– наиболее значимыми факторами, определяющими эффективность обеззараживания свиного бесподстилочного навоза по числу КОЕ ОКБ, являются: магнитная индукция в рабочей зоне индуктора активатора, концентрация активного хлора, время экспозиции. Наиболее предпочтительной моделью, формализующей данную связь, является квадратичный полином, учитывающий эффекты парного взаимодействия факторов;

– на основании контрфактуального анализа модели (5) установлено, что область интереса варьирования фактора допустимо расширить от 13 до 19 мг/литр для обеспечения требуемого санитарно-эпидемиологического эффекта, магнитную индукцию в рабочей зоне – от 50 до 100 мТл, расчетное значение критерия Фишера  $F_p = 4,195$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

Полученные результаты представляют собой исходные данные для создания интеллектуализированной цифровой системы оценки эффективности обеззараживания свиного бесподстилочного навоза и органических отходов в целом. Алгоритм контрфактуального анализа математических моделей позволяет оценить пределы их корректного функционирования, что позволяет повысить достоверность управления операциями и технологическими процессами в рамках их интеллектуализации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pig Manure Management: a Methodology for Environmentally Friendly Decision-making / A. Y. Izmailov [et al.] // *Animals*. 2022. Vol. 12, Issue 6. 747 с. <https://doi.org/10.3390/ani12060747>
2. Personal Problems in Russian Digital Agriculture / A. G. Ibragimov [et al.] // *Unlocking Digital Transformation of Agricultural Enterprises: Technology Advances, Digital Ecosystems, and Innovative Firm Governance*. Springer International Publishing. 2023. P. 283–290. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0_29)
3. Zhong Y., Tang L., Li Y. Role of Digital Empowerment in Developing Farmers' Green Production by Agro-Tourism Integration in Xichong, Sichua // *Agriculture*. 2022. Issue 12. P. 1761. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111761>
4. Digital System for Monitoring and Management of Livestock Organic Waste / A. Y. Izmailov [et al.] // *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022. Issue 121. P. 22–33. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_3)
5. Экологоэнергетический показатель внедрения наилучших доступных технологий утилизации куриного помета / А. Ю. Брюханов [и др.] // *Экология и промышленность России*. 2019. № 12. С. 29–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-12-29-33>
6. Kirilenko V., Dobrokvashina K. Agro-Industrial Complex of Russia: Problems and Prospects // *XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022" Global Precision Ag Innovation 2022*. 2023. Vol. 2. P. 1071–1078. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2\\_121](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_121)

7. Trukhachev V. I. Further Research Directions for Fostering Digital Transformation of Agriculture in Russia and Beyond // Unlocking Digital Transformation of Agricultural Enterprises: Technology Advances, Digital Ecosystems, and Innovative Firm Governance. 2023. P. 299–303. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0_31)
8. He Z., Jia Y., Ji Y. Analysis of Influencing Factors and Mechanism of Farmers' Green Production Behaviors in China // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2023. Vol. 20, Issue 2. P. 961. <https://doi.org/10.3390/ijerph20020961>
9. Advances in Recycling and Utilization of Agricultural Wastes in China: Based on Environmental Risk, Crucial Pathways, Influencing Factors, Policy Mechanism / B. Wang [et al.] // Procedia Environ. 2016. Vol. 31. P. 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.002>
10. Nicholas H. L., Mabbett I. Drying Dairy Manure Using a Passive Solar Still: A Case Study // Energy Nexus. 2023. Vol. 10. P. 100–183. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100183>
11. Insights into the Phenol Disinfectant on the Methane Performance from Wastewater by Mesophilic Anaerobic Digestion: Single and two Stages Analysis / H. Xu [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 170. P. 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.089>
12. Сайпуллаев У. М. Средства для обеззараживания ооцист кокцидий птиц // Ветеринария и кормление. 2022. № 5. С. 24–26. <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-5-7>
13. Effects of Different Composting Methods on Antibiotic-Resistant Bacteria, Antibiotic Resistance Genes, and Microbial Diversity in Dairy Cattle Manures / M. Tang [et al.] // Journal of Dairy Science. 2023. Vol. 106, Issue 1. P. 257–273. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22193>
14. Современные способы обеззараживания органических отходов животноводства / В. Г. Тюрин [и др.] // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2021. № 2 (38). С. 175–182. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyг.ecol.202102012>
15. Интенсификация процесса переработки отходов животноводства / К. О. Фирус [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2021. № 2 (66). С. 65–70. [https://doi.org/10.48012/1817-5457\\_2021\\_2\\_65](https://doi.org/10.48012/1817-5457_2021_2_65)
16. Application of the Thermophilic Fermentation Method to Obtain Environmentally Friendly Organic Fertilizer / Z. E. Bayazitova [et al.] // Journal of Ecological Engineering. 2023. Vol. 24. Issue 4. P. 202–216. <https://doi.org/10.12911/22998993/159647>
17. Технология очистки и использования смешанного хозяйственно-бытового и производственного стока в системе производственного водоснабжения / Ю. А. Галкин [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 1. С. 37–41. <https://doi.org/10.35776/VST.2023.01.05>
18. Журавлёв П. В., Алешня В. В., Марченко Б. И. Определение дезинфицирующего действия негашёной извести на микрофлору иловых осадков сточных вод очистных сооружений канализации и животноводческих комплексов // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98, № 5. С. 483–488. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-dezinfitsiruyushego-deystviyanegashyonyoz-izvesti-na-mikrofloru-ilovyh-osadkov-stochnyh-vod-ochistnyh-sooruzheniy> (дата обращения: 11.08.2023).
19. Примин О. Г. Эффективность и экологическая безопасность обеззараживания воды гипохлоритом // Экология и промышленность России. 2023. Т. 27, № 4. С. 28–33. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-28-33>
20. Воздействие импульсным СВЧ излучением на образцы пищевой продукции с целью увеличения показателей ее микробиологической безопасности и сроков хранения / Ю. В. Гуляев [и др.] // Проблемы особо опасных инфекций. 2022. № 3. С. 70–74. <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-3-70-74>
21. Санитарно-бактериологическое состояние органоминеральных компостов на основе отходов животноводства / В. Г. Тюрин [и др.] // Ветеринария. 2022. № 2. С. 41–44. <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyг.ecol.202104013>
22. Пазова Т. Х., Габаев А. Х. Переработка и утилизация бесподстилочного навоза // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2022. № 1 (35). С. 116–120. <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-1-35-116-120>

23. Бондаренко А. М., Качанов Л. С. Эффективность технологизации процессов переработки органических отходов животноводства // АПК: Экономика, управление. 2019. № 7. С. 54–61. <https://doi.org/10.33305/197-54>
24. Концептуальная модель энергетической эффективности получения экологически безопасного утилизационного свиного бесподстилочного навоза / Н. В. Бышов [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2020. Т. 30, № 3. С. 394–412. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.394-412>
25. Ecological and Technological Criteria for the Efficient Utilization of Liquid Manure / N. V. Byshov [et al.] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1>
26. Структурно-информационная модель повышения биотрансформационной интенсивности жидкой фракции свиного бесподстилочного навоза / С. Н. Борычев [и др.] // Техника и оборудование для села. 2021. № 4. С. 28–32. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-4-28-32>
27. Разработка рецептуры антисептиков и дезинфицирующих средств на основе наночастиц серебра / Н. С. Дымникова [и др.] // Российский химический журнал. 2023. Т. 67, № 1. С. 35–42. URL: <http://rcj-isuct.ru/article/view/5045> (дата обращения: 11.08.2023).
28. Нефедова Е. В., Шкиль Н. Н. Влияние наночастиц серебра и дезинфектантов на бактерицидную активность относительно *S. Enteritidis* // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 11 (217). С. 90–94. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-nanochastits-serebra-i-dezinfektantov-na-bakteritsidnyuyu-aktivnost-otnositelno-s-enteritidis> (дата обращения: 11.08.2023).
29. Моделирование эпидемиологических свойств бесподстилочного навоза при подготовке физико-химическим обеззараживанием / А. А. Цымбал [и др.] // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2020. № 3. С. 89–98. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-epidemiologicheskikh-svoystv-bespodstilochnogo-navoza-pri-podgotovke-fiziko-himicheskimi-obezrazhivaniem> (дата обращения: 11.08.2023).
30. Гриднева П. И., Гриднева Т. Т. Результаты исследований процесса обработки навоза крупного рогатого скота в аппаратах вихревого слоя // Техника и оборудование для села. 2021. № 6 (288). С. 29–31. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-6-29-31>
31. Ковалев Д. А., Ковалев А. А. Исследование процесса очистки биогаза от сернистых соединений с использованием аппарата вихревого слоя // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2020. Т. 67, № 4 (41). С. 63–67. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-4-63-67>
32. Селиверстов Г. В., Мотевич С. А., Вобликова Ю. О. Аппарат вихревого слоя в технологии измельчения торфяных грунтов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 7. С. 391–395. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-7-391-396>
33. Эффективность двухфазного анаэробного сбраживания и физико-химические свойства органической фракции твердых коммунальных отходов, предобработанных в аппарате вихревого слоя / Э. Р. Михеева [др.] // Прикладная биохимия и микробиология. 2020. Т. 56, № 6. С. 619–626. <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>
34. Григорьев В. С., Романов И. В. Применение аппарата вихревого слоя для механического измельчения веществ в водном потоке // Технический сервис машин. 2021. № 2 (143). С. 62–70. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-2-62-70>
35. Лаврентьев А. А., Лимаренко Н. В., Хохлова К. В. Моделирование электромагнитных характеристик индуктора электрического вихревого аппарата в среде ComsolMultiphysics // Известия вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64, № 3. С. 12–17. <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2021-3-12-17>
36. Экспериментальное исследование влияния массы рабочих тел на параметры, характеризующие качество функционирования индуктора / Н. В. Лимаренко [и др.] // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 90–96. <https://doi.org/10.12737/19701>
37. Моделирование влияние влажности бесподстилочного навоза на уровень его санитарно-эпидемиологической нагрузки / С. Н. Борычев [и др.] // Вестник Рязанского агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2021. Т. 13, №. 2. С. 79–87. <https://doi.org/10.36508/RSATU.2021.50.2.011>

38. Pesaran M. H., Smith R. P. Counterfactual Analysis in Macroeconometrics: An Empirical Investigation into the Effects of Quantitative Easing // Research in Economics. 2016. Vol. 70, Issue 2. P. 262–280. <https://doi.org/10.1016/j.rie.2016.01.004>

39. Dettmann E., Giebler A., Weyh A. Flexpanelid: A Stata Toolbox for Causal Analysis with Varying Treatment Time and Duration // SSRN. 2020. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17624.24325>

40. Runhardt R. W. Concrete Counterfactual Tests for Process Tracing: Defending an Interventionist Potential Outcomes Framework // Sociological Methods & Research. 2022. <https://doi.org/10.1177/00491241221134523>

*Поступила в редакцию 24.04.2023; поступила после рецензирования 02.08.2023; принята к публикации 20.08.2023*

*Об авторах:*

**Лобачевский Яков Петрович**, доктор технических наук, профессор, академик-секретарь отделения сельскохозяйственных наук РАН, первый заместитель директора по развитию и инновациям Федерального научного агроинженерного центра ВИМ (109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>, Researcher ID: H-5863-2018, [lobachevsky@yandex.ru](mailto:lobachevsky@yandex.ru)

**Шемякин Александр Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ректор Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5019-258X>, [shem.alex62@yandex.ru](mailto:shem.alex62@yandex.ru)

**Лимаренко Николай Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), профессор кафедры приборостроения и биомедицинской инженерии Донского государственного технического университета (344000, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, Researcher ID: O-5342-2017, [limarenkodstu@yandex.ru](mailto:limarenkodstu@yandex.ru)

**Успенский Иван Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспорта Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Researcher ID: B-7990-2019, [ivan.uspensckij@yandex.ru](mailto:ivan.uspensckij@yandex.ru)

**Юхин Иван Александрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автотракторной техники и теплоэнергетики Рязанского государственного агротехнологического университета имени П. А. Костычева (390044, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Костычева, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, [ivan.uspensckij@yandex.ru](mailto:ivan.uspensckij@yandex.ru)

*Заявленный вклад авторов:*

Я. П. Лобачевский – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка цели и задач исследования, формирование частных и общих выводов.

А. В. Шемякин – предоставление исходных данных для создания математической модели, анализ информационных источников.

Н. В. Лимаренко – проведение исследования, подготовка первоначального варианта текста, обработка экспериментальных данных и их контрфактуальный анализ.

И. А. Успенский – научное руководство, формулирование основной концепции исследования, постановка цели и задач исследования, формирование частных и общих выводов.

И. А. Юхин – проведение анализа информационных источников, обработка изображений, корректировка общих и частных выводов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Izmaylov A., Briukhanov A., Shalavina E., Vasilev E. Pig Manure Management: A Methodology for Environmentally Friendly Decision-Making. *Animals*. 2022;12(6):747. <https://doi.org/10.3390/ani12060747>
2. Ibragimov A.G., Dzodzieva F.N., Donskaya N.P., Lolaeva B.H., Bolatova L.K. Personal Problems in Russian Digital Agriculture. Digital Transformation of Agricultural Enterprises: Technological Achievements, Digital Ecosystems and Innovative Management of Firms. *Springer International Publishing*. 2023;283–290. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0_29)
3. Zhong Y., Tang L., Li Y. The Role of Expanding Digital Opportunities in the Development of Environmentally Friendly Production of Farmers Through the Integration of Agrotourism in Xichun, Sichua. *Agricultural Industry*. 2022;12:1761. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111761>
4. Izmailov A.Yu., Dorokhov A.S., Briukhanov A., Popov V.D., Shalavina E.V., Okhtilev M. Yu., Komyslichenko V. N. Digital System of Monitoring and Management of Organic Waste of Animal Husbandry. Lecture Notes on Information Technologies and Communication Technologies. 2022;121:22–33. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97057-4_3)
5. Bryukhanov A.Yu., Subbotin I.A., Timofeev Ye.V., Erk A.F. Ecologoenergetic Indicator of the Introduction of the Best Available Technologies for the Disposal of Chicken Manure. *Ecology and Industry of Russia*. 2019;(12):29–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-12-29-33>
6. Kirilenko V., Dobrokvashina K. Agro-Industrial Complex of Russia: Problems and Prospects. *XV International Scientific Conference "INTERAGROMASH 2022" Global Precision Ag Innovation*. 2023;1071–1078. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2\\_121](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21219-2_121)
7. Trukhachev V.I. Further Directions of Research to Promote Digital Transformation of Agriculture in Russia and Abroad. *Disclosure of Digital Transformation of Agricultural Enterprises: Technological Achievements, Digital Ecosystems and Innovative Management of Firms*. 2023;299–303. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13913-0_31)
8. He Z., Jia Y., Ji Y. Analysis of Influencing Factors and the Mechanism of Farmers' Behavior in the Field of Environmentally Friendly Production in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023;20(2):961. <https://doi.org/10.3390/ijerph20020961>
9. Wang B., Dong F., Chen M., Zhu J., Tan J., Fu X., et al. Achievements in the Field of Processing and Utilization of Agricultural Waste in China: Based on Environmental Risks, the Most Important Ways, Influencing Factors, Policy Mechanism. *Procedia Environ*. 2016;31:12–17. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.002>
10. Nicholas H.L., Mabbett I. Drying Milk Manure Using a Passive Solar Installation: A Case Study. *Energy Nexus*. 2023;10:100–183. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100183>
11. Xu H., Wang T., Zhou Y., Shi W., Huang Z., Ruan W. The Effect of Phenolic Disinfectant on the Methane Content in Wastewater During Mesophilic Anaerobic Digestion: Analysis in One and Two Stages. *Safety of Technological Processes and Environmental Protection*. 2023;170:19–27. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.089>
12. Saypullaev U.M. Means for Disinfection of Coccidium Oocysts of Birds. *Veterinary Medicine and Feeding*. 2022;(5):24–26. <https://doi.org/10.30917/ATT-VK-1814-9588-2022-5-7>
13. Tang M., Wu Z., Li W., Shoaib M., Aqib A.I., Shang R., et al. Effects of Different Composting Methods on Antibiotic-Resistant Bacteria, Antibiotic Resistance Genes, and Microbial Diversity in Dairy Cattle Manures. *Journal of Dairy Science*. 2023;106(1):257–273. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-22193>
14. Tyurin V.G., Mysova G.A., Kochish O.I., Biryukov K.N., Rodionova N.V. Modern Methods of Disinfection of Organic Animal Waste. *Russian Journal Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology*. 2021;(2):175–182. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202102012>
15. Firus K.O., Anisimova K.V., Glavatskikh N.G., Porobova O.B., Maksimova Ye.V., Spiridonov A.B., et al. Intensification of the Process of Processing Animal Waste. *Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy*. 2021;(2):65–70. (In Russ., abstract in Eng.) [https://doi.org/10.48012/1817-5457\\_2021\\_2\\_65](https://doi.org/10.48012/1817-5457_2021_2_65)

16. Bayazitova Z.E., Kurmanbayeva A.S., Tleuova Z.O., Temirbekova N.G. Application of the Thermophilic Fermentation Method to Obtain Environmentally Friendly Organic Fertilizer. *Journal of Ecological Engineering*. 2023;24(4):202–216. <https://doi.org/10.12911/22998993/159647>
17. Galkin Yu.A., Baskov Ye.M., Ulasovets Ye.A., Obadin D.N., Ermakov D.V., Knaub E.A. Technology of Purification and Use of Mixed Household and Industrial Runoff in the Industrial Water Supply System. *Water Supply and Sanitary Equipment*. 2023;(1):37–41. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.35776/VST.2023.01.05>
18. Zhuravlev P.V., Alyoshnya V.V., Marchenko B.I. Determination of the Disinfecting Effect of Quicklime on the Microflora of Sludge from Sewage Treatment Plants and Livestock Complexes. *Hygiene and Sanitation*. 2019;98(5):483–488. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-dezinfitsiruyuschego-deystviya-negashyonoy-izvesti-na-mikrofloru-ilovyh-osadkov-stochnyh-vod-ochistnyh-sooruzheniy> (accessed 11.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
19. Primin O.G. Efficiency and Environmental Safety of Water Disinfection with Hypochlorite. *Ecology and Industry of Russia*. 2023;27(4):28–33. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2023-4-28-33>
20. Gulyaev Yu.V., Meshchanov V.P., Kats B.M., Koplevatsky N.A., Lopatin A.A., Sayapin K.A., et al. Exposure of Food Samples to Pulsed Microwave Radiation to Increase their Microbiological Safety and Shelf Life. *Problems of Particularly Dangerous Infections*. 2022;(3):70–74. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21055/0370-1069-2022-3-70-74>
21. Tyurin V.G., Mysova G.A., Potemkina N.N., Sakharov A.Yu., Kochish O.I., Biryukov K.N. Sanitary-Bacteriological State of Organomineral Compost Based on Animal Husbandry Waste. *Veterinary Medicine*. 2022;(2):41–44. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36871/vet.san.hyg.ecol.202104013>
22. Pazova T.Kh., Gabaev A.Kh. Processing and Utilization of Unlited Manure. *Proceedings of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2022;(1):116–120. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.55196/2411-3492-2022-1-35-116-120>
23. Bondarenko A.M., Kachanov L.S. Efficiency of Technologization of Processes of Processing of Organic Waste of Animal Husbandry. *Agroindustrial Complex: Economics, Management*. 2019;(7):54–61. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33305/197-54>
24. Byshov N., Uspenskiy I., Yukhin I., Chatkin M., Limarenko N. Conceptual Model of Energy Efficiency for Environmentally Safe Utilization of Liquid Pig Manure. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(3):394–412. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.394-412>
25. Byshov N.V., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Limarenko N.V. Ecological and Technological Criteria for Effective Utilization of Liquid Manure. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020;012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/422/1/012069>
26. Borychev S.N., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Limarenko N.V., Fomin S.D., Mishurov N.P. Structural and Informational Model of Increasing the Biotransformation Intensity of the Liquid Fraction of Pork Liquid Manure. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021;(4):28–32. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-4-28-32>
27. Dymnikova N., Yerokhina Ye., Moryganov A., Kuznetsov O. Formulation Development of Antiseptics and Disinfectants Based on Silver Nanoparticles. *Russian Chemical Journal*. 2023;67(1):35–42. Available at: <http://rcj-isuct.ru/article/view/5045> (accessed 11.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
28. Nefedova Ye.V., Shkil N.N. Influence of Silver Nanoparticles and Disinfectants on Bactericidal Activity Relative to *S. Enteritidis*. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;(11):90–94. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2022-217-11-90-94>
29. Tsymbal A.A., Uspenskiy I.A., Yukhin I.A., Limarenko N.V. Modeling of the Epidemiological Properties of Liquid Manure During Its Preparation by Physico-Chemical Disinfection. *Bulletin of the Ryazan Agrotechnological University*. 2020;(3):89–98. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovaniye-epidemiologicheskikh-svoystv-bespodstilochnogo-navoza-pri-podgotovke-fiziko-himicheskim-obezzarazhivaniem> (accessed 11.08.2023). (In Russ., abstract in Eng.)
30. Gridnev P.I., Gridneva T.T. Results of Research on the Processing of Cattle Manure in Vortex Layer Apparatuses. *Machinery and Equipment for the Village*. 2021;(6):29–31. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-6-29-31>

31. Kovalev D.A., Kovalev A.A. Investigation of the Biogas Purification Process from Sulfur Compounds Using a Vortex Layer Apparatus. *Electrotechnologies and Electrical Equipment in the Agroindustrial Complex*. 2020;67(4):63–67. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-4-63-67>
32. Seliverstov G.V., Motevich S.A., Voblikova Yu.O. The Apparatus of the Vortex Layer in the Technology of Grinding Peat Soils. *News of Tula State University. Technical Sciences*. 2022;(7):391–395. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-7-391-396>
33. Mikheeva E.R., Katraeva I.V., Vorozhtsov D.L. Efficiency of Two-Phase Anaerobic Digestion and Physico-Chemical Properties of Organic Fraction of Municipal Solid Waste Pretreated in the Vortex Layer Apparatus. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2020;56(6):619–626. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.31857/S0555109920060112>
34. Grigoriev V.S., Romanov I.V. Application of the Vortex Layer Apparatus for Mechanical Grinding of Substances in a Water Stream. *Technical Service of Machines*. 2021;2:62–70. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-2-62-70>
35. Lavrentiev A.A., Limarenko N.V., Khokhlova K.V. Modeling of Electromagnetic Characteristics of an Inductor of an Electric Vortex Apparatus in the Medium of ComsolMultiphysics. *University News. Electromechanics*. 2021;64(3):12–17. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.17213/0136-3360-2021-3-12-17>
36. Limarenko N.V., Zharov V.P., Panov Y.V., Shapoval B.G. Experimental Study of the Influence of the Mass of Working Bodies on the Parameters Characterizing the Quality of Inductor Functioning. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2016;16–2(85):90–96. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.12737/19701>
37. Borychev S.N., Limarenko N.V., Rakyl E.A., Yukhin I.A. Modeling the Influence of Moisture of Liquid Manure on the Level of Its Sanitary and Epidemiological Load. *Bulletin of the Ryazan Agrotechnological University*. 2021;13(2):79–87. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.36508/RSATU.2021.50.2.011>
38. Pesaran M.H., Smith R.P. Counterfactual Analysis in Macroeconomics: An Empirical Study of the Effects of Quantitative Easing. *Research in Economics*. 2016;70(2):262–280. <https://doi.org/10.1016/j.rie.2016.01.004>
39. Dettmann E., Gibler A., Weich A. Flexpanelid: A Stata Toolbox for Causal Analysis with Varying Treatment Time and Duration. *SSRN*. 2020. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17624.24325>
40. Runhardt R. Defending an Interventionist Potential Outcomes Framework. Concrete Counterfactual Tests for Processes Tracking. *Sociological Methods and Research*. 2022. <https://doi.org/10.1177/00491241221134523>

Submitted 24.04.2023; revised 02.08.2023; accepted 20.08.2023

*About authors:*

**Yakov P. Lobachevsky**, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Academician-Secretary of the Department of Agricultural Sciences of the Russian Academy of Sciences, First Deputy Director for Development and Innovation, Federal Scientific Agroengineering Center VIM (5 1<sup>st</sup> Institutskiy Pereulok, Moscow 109428, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7863-2962>, Researcher ID: H-5863-2018, [lobachevsky@yandex.ru](mailto:lobachevsky@yandex.ru)

**Alexander V. Shemyakin**, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Rector of Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5019-258X>, [shem.alex62@yandex.ru](mailto:shem.alex62@yandex.ru)

**Nikolay V. Limarenko**, Dr.Sci. (Engr.), Professor of the Chair of Technical Operation of Transport of the Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), Professor of the Chair of Instrumentation and Biomedical Engineering of the Don State Technical University (1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344000, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, Researcher ID: O-5342-2017, [limarenkodstu@yandex.ru](mailto:limarenkodstu@yandex.ru)

**Ivan A. Uspensky**, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Technical Operation of Transport, Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>, Researcher ID: B-7990-2019, [ivan.uspensckij@yandex.ru](mailto:ivan.uspensckij@yandex.ru)

**Ivan A. Yukhin**, Dr.Sci. (Engr.), Professor, Head of the Chair of Automotive Engineering and Thermal Power Engineering of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (1 Kostycheva St., Ryazan 390044, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, Researcher ID: Q-8188-2017, [ivan.uspensckij@yandex.ru](mailto:ivan.uspensckij@yandex.ru)

*Authors contribution:*

Ya. P. Lobachevsky – scientific guidance, formulating the basic concept of research, setting goals and objectives of research, formulating particular and general conclusions.

A. V. Shemyakin – providing initial data for creating a mathematical model, analyzing information sources.

N. V. Limarenko – conducting research, preparing the initial version of the text, processing experimental data and the counterfactual analysis of them.

I. A. Uspensky – scientific guidance, formulating the basic concept of research, setting goals and objectives of research, formulating particular and general conclusions.

I. A. Yukhin – analyzing information sources, processing images, correcting general and particular conclusions.

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