ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. АГРОИНЖЕНЕРИЯ

DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-29

THE USE OF FUZZY MODELING IN ASSESSING THE INTENSITY
OF TECHNOLOGIES FOR THE DISPOSAL OF ORGANIC WASTES. N. Borychev¹, N. V. Limarenko^{1,2}, E. A. Rakul³,
I. A. Uspensky¹, I. A. Yukhin¹, K. V. Khokhlova²¹Ryazan State Agrotechnological University named after P. A. Kostychev, Ryazan²Don State Technical University, Rostov-on-don³Bryansk State Agrarian University, Bryansk

Received 15.01.2021

Submitted 02.03.2021

*The work was performed under the grant, the research Fund of assistance to development
of small forms of enterprises in scientific-technical sphere,
contract number 3822ГС1/63200 from 19.12.2020*

Summary

The possibility of using fuzzy set methods in making optimal decisions for comparing multiparametric objects is considered, using the example of technological approaches to the disposal of organic waste, and using the Harrington desirability function, a promising approach from the energy and environmental point of view is determined.

Abstract

Introduction. The directions of organic waste utilization, on the example of liquid manure, as a promising energy carrier, are considered. The advantages and disadvantages of the approaches used are analyzed in terms of biotransformation intensity in accordance with the requirements of environmental safety and energy efficiency. The methods of making optimal decisions under the specified conditions are considered. The prospects of using fuzzy set methods relative to the methods of calculus of variations when comparing multifactorial and multivariate objects are proved by the example of organic waste disposal approaches. Geometric interpretations of the described approaches are presented. The relevance of the research and its importance for science and technology is confirmed by the lack of universal solutions that ensure maximum energy and environmental efficiency in the disposal of organic waste. Based on the analysis, the aim of the study is formulated, which is to evaluate the effectiveness of approaches to the disposal of organic waste from animal husbandry using fuzzy modeling methods. **Object.** Technological approaches to the utilization of organic animal waste. Subject – parameters of energy and environmental efficiency. **Materials and methods.** The analysis of sources and the results of preliminary studies confirmed the effectiveness of using fuzzy set methods in making optimal decisions in comparing technological approaches to the utilization of organic waste into organic fertilizers. It is established that the most promising method is the use of Harrington desirability functions. The essence of which is to establish correspondences between the natural values of the particular indicators of the objects being compared and the psychophysical parameters that represent expert a posteriori estimates of the desirability of the values of the indicators, in accordance with the desirability grading. Desirability grading is a range of values from 0 to 1 that determines the correspondence of values from least to most preferred based on a generalized integral criterion. The interpretation of the values of energy and environmental intensity of technological approaches to the disposal of organic waste is carried out in accordance with the grading of the Harrington scale according to the following levels of preferences: «high», «above average», «medium», «below average», «low». **Results and conclusions.** As a result of the behavioral study, the prospects of using fuzzy modeling methods in making optimal decisions for studies of multivariate and multifactorial objects are justified, using the example of the Harrington desirability function; the efficiency of using the Harrington desirability function in the ranking of approaches to the utilization of organic waste from animal husbandry on the example of liquid manure, depending on the bio-transformation intensity, is proved; it is established

that the most optimal from the point of view of the intensity of biotransformation is a technology providing for the utilization of liquid organic waste into liquid bio-organic fertilizer and use activator disinfection, ensuring reduced time and energy costs while maintaining required regulatory documents level of environmental safety of energy. The perspective of the development of the obtained results is the development of tools for digitalization of comparison of multiparametric objects and automation of their evaluation.

Key words: *fuzzy modeling, Harrington desirability function, organic waste, technological approaches to the disposal of organic waste.*

Citation. Borychev S.N., Limarenko N.V., Rakul E.A., Uspensky I.A., Yukhin I.A., Khokhlova K.V. The use of fuzzy modeling in assessing the intensity of technologies for the disposal of organic waste. *Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp.* 2021. 1(61). 298-315 (in Russian). DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-29.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

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

УДК 519.863

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЁТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ УТИЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

С. Н. Борычев¹, доктор технических наук, профессор
Н. В. Лимаренко^{1,2}, кандидат технических наук, доцент
Е. А. Ракул³, кандидат технических наук, доцент
И. А. Успенский¹, доктор технических наук, профессор
И. А. Юхин¹, доктор технических наук, профессор
К. В. Хохлова², студент

¹ФГБОУ ВО Рязанский агротехнологический университет имени П. А. Костычева

²ФГБОУ ВО Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

³ФГБОУ ВО Брянский государственный аграрный университет

Дата поступления в редакцию 15.01.2021

Дата принятия к печати 02.03.2021

Работа выполнена в рамках реализации гранта ФГБУ Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор № 3822ГС1/63200 от 19.12.2020

Актуальность. Рассмотрены направления утилизации органических отходов на примере бесподстилочного навоза как перспективного энергоносителя. Проведён анализ преимуществ и недостатков используемых подходов с точки зрения биотрансформационной интенсивности в соответствии с требованиями экологической безопасности и энергетической эффективности. Рассмотрены методы принятия оптимальных решений при выполнении обозначенных условий. Доказана перспективность использования методов нечётких множеств относительно методов вариационного исчисления при сравнении многофакторных и многопараметрических объектов на примере подходов утилизации органических отходов. Представлены геометрические интерпретации описанных подходов. Актуальность исследования и его важность для науки и техники подтверждается отсутствием универсальных решений, обеспечивающих максимальную энерго-экологическую эффективность при утилизации органических отходов. На основании проведённого анализа сформулирована цель исследования, представляющая оценку эффективности подходов утилизации органических отходов животноводства с использованием методов нечёткого моделирования. **Объект** – технологические подходы утилизации органических отходов животноводства. **Предмет** – параметры энерго-экологической эффективности. **Материалы и методы.** Анализ источников и результаты предварительных исследований подтвердили эффективность использования методов нечётких

множеств при принятии оптимальных решений в сравнении технологических подходов утилизации органических отходов в органические удобрения. Установлено, что наиболее перспективным методом является использование функций желательности Харрингтона. Его суть заключается в установлении соответствий между натуральными значениями частных показателей сравниваемых объектов и психофизических параметров, представляющих экспертные апостериорные оценки желательности значения показателей, в соответствии с градуировкой желательности. Градуировка желательности представляет собой диапазон значений от 0 до 1, определяющий соответствие значений от наименее к наиболее предпочтительному на основании обобщённого интегрального критерия. Интерпретация значений энергетической и экологической интенсивности технологических подходов утилизации органических отходов осуществляется в соответствии с градуировкой шкалы Харрингтона по следующим уровням предпочтений: «высокий», «выше среднего», «средний», «ниже среднего», «низкий». **Результаты и выводы.** В результате проведённого исследования обоснована перспективность использования методов нечёткого моделирования при принятии оптимальных решений исследований многопараметрических и многофакторных объектов на примере функции желательности Харрингтона; доказана эффективность использования функции желательности Харрингтона при ранжировании подходов утилизации органических отходов животноводства на примере бесподстильного навоза, в зависимости от биотрансформационной интенсивности; установлено, что наиболее оптимальной с точки зрения интенсивности биотрансформации является технология, предусматривающая утилизацию жидких органических отходов в жидкое биоорганическое удобрение и использование активатора обеззараживания, обеспечивающего сокращение временных и энергетических затрат при сохранении требуемого нормативными документами уровня экологической безопасности энергоносителя. Перспективой развития полученных результатов является совершенствование инструментов цифровизации сравнения многопараметрических объектов и автоматизации их оценки.

Ключевые слова: нечёткое моделирование, функция желательности Харрингтона, органические отходы, технологии утилизации органических отходов.

Цитирование. Борычев С. Н., Лимаренко Н. В., Ракул Е. А., Успенский И. А., Юхин И. А., Хохлова К. В. Использование нечёткого моделирования при оценке интенсивности технологий утилизации органических отходов. *Известия НВ АУК*. 2021. 1 (61). 298-315. DOI: 10.32786/2071-9485-2021-01-29.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение. Традиционно органические отходы обладают энергетическим потенциалом и представляют интерес для использования в качестве удобрений. Однако для его полноценного использования необходимо минимизировать соответствующие патогенные влияния на окружающую экосистему. Решить данную проблему можно выбрав оптимальный подход к их утилизации. Согласно [5, 6, 8, 11, 12], основными недостатками применяемых решений являются ресурсоёмкость и низкая экологическая безопасность, что делает важным формулирование критериев, позволяющих применить методы поиска оптимальных решений, снижающих уровень патогенного влияния и повышающих энергетический потенциал органических отходов. Одной из наиболее отходоёмких отраслей является животноводство, наиболее типичным отходом которого является бесподстильный навоз, обусловленный высокими производственными мощностями хозяйств. Соответственно, задача оптимизации ресурсов, направленных на его утилизацию, является важной для науки и техники. Процесс утилизации бесподстильного навоза (далее органических отходов) – комплекс мероприятий, требующий высоких ресурсозатрат. Эффективность применяемых решений определяется не только за-

трачиваемой мощностью, но и регламентами безопасности. Соответственно, задача оценки эффективности используемых подходов с точки зрения энергоинтенсивности является актуальной. Энергетическая оценка проводится при сравнительном анализе существующих технологий с целью выявления наиболее привлекательных по наименьшему значению энергоемкости производства [5, 15, 24]. Решить поставленную задачу можно используя методы принятия оптимальных решений при обеспечении заданных условий, наиболее типичными из них являются линейное, нелинейное, динамическое, выпуклое программирование, теория игр и другие, относящиеся к вариационному исчислению при решении задач максимизации / минимизации целевой функции. Согласно [7, 10, 18, 20, 21, 23], при анализе технических систем и средств достаточно широкое применение нашли симплекс-метод, метод графической оптимизации и оптимизация по Лагранжу. Их суть сводится к нахождению некоторого минимума целевой функции в области геометрически детерминированного конечномерного пространства, ограниченного набором линейных и нелинейных неравенств. Установлено [7, 13, 18], что недостатком перечисленных подходов является сложность использования при рассмотрении и сравнении многокритериальных и многопараметрических функционалов.

Поскольку принятие оптимального решения при снижении энергетических затрат и сохранении требуемой экологической безопасности в процессе утилизации органических отходов животноводства является многофакторной и многопараметрической задачей, для решения которой рационально использование методов нечёткого моделирования [1, 2, 4, 16, 19], преимуществом которых является возможность категоризации, классификации на основании обобщённых критериев, позволяющих учитывать многокритериальность и многопараметричность сравниваемых объектов.

Цель исследования – оценка эффективности подходов утилизации органических отходов животноводства с использованием методов нечёткого моделирования.

Материалы и методы. Объектом исследования являются технологические подходы утилизации органических отходов животноводства, предметом – параметры их энергетической, экологической и экономической эффективности.

Как показал анализ [3, 13, 14, 17, 20] технологии утилизации органических отходов можно категоризировать в зависимости от принципов и механизмов, лежащих в их основе, на биологические и физические. В основе биологической реализации лежат принципы биотрансформации (биоферментация, биоконверсия и т. д.). Суть технологий утилизации ферментационного типа заключается в минерализации и гумификации органических отходов в биотермических аэробных условиях под действием мезофильной и термофильной бактериальной составляющей. Преимуществами данного подхода являются относительная простота используемых технических средств, достаточно высокая бактерицидная и гельминтологическая эффективность, исключение всхожести семян сорных растений. Недостатками являются: необходимость поддержания высокого температурного режима (свыше 100 °С), высокая длительность операционных воздействий, сложность контроля биотрансформационных процессов и поддержания условий их течения, значительная зависимость эффекта от исходной влажности (наиболее оптимальным является технологическое значение 45...60 %). В зависимости от исходных физико-реологических свойств утилизируемого материала, направления его дальнейшего использования, а также природно-климатических условий реализации используют несколько вариаций данного подхода, определяющих его интенсивность. Направлением утилизации материалов, полученных в результате реализации данных воздействий, является использование в качестве органических удобрений, а также получение биогаза.

Кроме технологий биологических принципов, лежащих в основе утилизации органических отходов, перспективным является использование физических активаторов тепло-массообменных процессов. Суть технологий утилизации физического типа в общем виде заключается в интенсификации тепло-массообменных процессов сред, приводящих к лизису бактериальных форм с помощью специальных технических средств. Одним из перспективных устройств реализации данного подхода является активатор. К преимуществам данного подхода относят высокую бактерицидную и гельминтологическую эффективность при небольшой продолжительности воздействия, низкую удельную энергоёмкость, контролируемость процесса, возможность использования химических активаторов в сниженных концентрациях, низкая зависимость влияния на эффект мутности, жёсткости и pH обрабатываемой среды. К недостаткам можно отнести необходимость поиска оптимальных параметров операции в зависимости от физико-реологических свойств обрабатываемого материала.

На основании анализа [5, 6, 9, 10, 12, 22], в таблице 1 представлены последовательности операционных воздействий подходов утилизации органических отходов, в зависимости от агроклиматических условий, направлений дальнейшего использования и типов животных.

Таблица 1 – Операции утилизационного цикла органических отходов

Table 1 – Operations of the organic waste recycling

№	Операционные воздействия / Operational impacts	Технологии утилизации органических отходов / Technologies for recycling organic waste								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Приём субстрата / Substrate reception				+					
2	Сбор / Gathering	+	+	+		+	+	+	+	+
3	Транспортировка / Transportation	+	+	+	+	+	+	+	+	+
4	Отстаивание предсепарационное / Pre-separation desilting							+	+	+
5	Смешивание с наполнителем / Mixing with filler	+		+			+			
6	Буртование / Clamping						+			
7	Грубое фракционное разделение / Coarse frac- tional separation								+	
8	Тонкое разделение жидкой фракции / Thin sepa- ration of liquid fraction								+	
9	Компостирование тонко разделённой жидкой фракции / Composting of thin separation of liquid fraction								+	
10	Сбор тонко разделённой жидкой фракции в био- логический пруд / Gathering of thin separation of liquid fraction in biological pond								+	
11	Загрузка в биоферментатор / Loading in biofer- menter	+		+		+				
12	Загрузка в ферментер / газгольдер / Loading in fermenter / gas-holder				+					
13	Аэрация / Aeration						+			
14	Параллельная ферментация / Parallel fermentation			+						
15	Биоферментация / Biofermentation	+		+						
16	Хранение в навозохранилище / Storage in manure lagoon		+							

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
17	Разделение на твёрдую и жидкую фракцию / Separation on solid and liquid fractions				+			+		+
18	Подача жидкой фракции в активатор обеззараживания / Supply liquid fraction in decontamination activator									+
19	Обеззараживание жидкой фракции в активаторе / Decontamination liquid fraction in activator									+
20	Накопление обеззараженной жидкой фракции в хранилище / Accumulation of the decontaminated liquid fraction in the storage									+
21	Фракционная утилизации твёрдого компоста и жидкой фракции / Fractional utilization of solid compost and liquid fraction				+					
22	Гидролиз, кислотообразование, ацетатогенез, метаногенез / Hydrolysis, acid formation, acetogenesis, methanogenesis				+					
23	Хранение, аэрация жидкой фракции / Storage, aeration of liquid fraction							+		
24	Погрузка / транспортировка жидкой фракции / Loading / transportation of liquid fraction							+		
25	Смешивание твёрдой фракции с наполнителем / Mixing solid fraction with filler							+		
26	Компостирование твёрдой фракции / Composting of solid fraction								+	
27	Буртование твёрдой фракции / Clamping of solid fraction							+		
28	Погрузка / транспортировка / Loading / transportation						+		+	
29	Внесение в качестве удобрения / Fertilization	+	+	+		+	+	+	+	+

На рисунке 1 представлена блок-схема рассмотренных подходов и оборудования используемых при утилизации органических отходов животноводства.

Согласно [7, 13, 20, 23], перспективным инструментом оценки многофакторных и разнопараметрических технических средств и подходов с помощью нечётких множеств является применение их частного случая в виде функции желательности Е. К. Харрингтона. При нем натуральные значения сравниваемых параметров конвертируются в некоторую безразмерную градуировочную шкалу, выражающую желательность. К преимуществам данного инструмента можно отнести соответствие функции желательности требованиям, интеграции в общий экспертный исполнительный аппарат по следующим параметрам: количественности; возможности выражения группы параметров обобщённым критерием; однозначности; универсальности и полноты – как общей, неспецифичной характеристики объекта. Согласно [20], градуировка желательности представляет собой психофизическую шкалу, функцией которой является установление соответствий между натуральными значениями частных показателей, в качестве которых выступают параметры предложенных технологий, и психофизических параметров, представляющих экспертные апостериорные оценки желательности значения показателей. Градуировка шкалы представляет соответствие наиболее предпочтительному значению критерия высокого значения желательности в диапазоне от 0 до 1. Диапазоны градуировки шкалы представлены в работах [1, 13, 16, 20].

Рисунок 1 – Блок-схемы подходов и оборудования утилизации органических отходов

Figure 1 – Block diagrams of approaches and equipment for organic waste disposal

Рассмотрим основы конвертирования натуральных значений параметров в психофизическую градуировку желательности. Граничными условиями шкалы являются два значения $d = 0$ и $d = 1$. При этом 1 соответствует максимально желательному значению функции, а 0 максимально нежелательному. Преимуществом данной градуировки является унифицированность вычислений, при которой $d = 0,63 \approx 1 - (1 / e)$. Для сравнения технологий утилизации органических отходов используем следующие параметры желательности: удельные энергетические затраты, относительный уровень экологической безопасности, выраженный пролонгированным бактерицидным эффектом и уровнем эпидемиологической безопасности, а также интенсивность биотрансформационных способностей подходов. Оценка интенсивности биотрансформационных способностей подходов утилизации органических отходов, представленных в таблице 1, осуществлялась с использованием следующей зависимости:

$$i_{bts} = \frac{\sum_i^n \frac{(N_i + Q_i + S_i) \cdot t_i}{q_i}}{n_{\text{КОЕ}}^{\text{ПАТ}} - \sum_i^n \left[\left(1 - \frac{n_{\text{КОЕ}-x}^{\text{ПАТ}}}{n_{\text{КОЕ}}^{\text{ПАТ}}} \right) \cdot n_{\text{КОЕ}-x}^{\text{ПАТ}} \right]}, \quad (1)$$

где N_i – удельные затраты активной мощности на реализацию i -го операционного воздействия технологического подхода, кВт·ч; Q_i – удельные затраты реактивной мощности на реализацию i -го операционного воздействия технологического подхода, кВАр·ч; S_i – удельные затраты полной мощности на реализацию i -го операционного воздействия технологического подхода, кВА·ч; t_i – момент времени затрачиваемый на реализацию i -го операционного воздействия технологического подхода, ч; q_i – производительность i -го операционного воздействия, кг/ч; $n_{\text{КОЕ}}^{\text{ПАТ}}$ – число колониеобразующих единиц патогенных бактерий до реализации i -го операционного воздействия технологического подхода, шт.; $n_{\text{КОЕ}-x}^{\text{ПАТ}}$ – число колониеобразующих единиц патогенных бактерий после реализации i -го операционного воздействия технологического подхода, шт.

Кодирование частных значений функции желательности d_i в обобщенную функцию желательности D осуществляется в результате свёртки, алгоритм которой подробно описан в работе [20]. Число используемых показателей может зависеть от типа систем. Сглаживание аппроксимирующей составляющей функции желательности происходит за счёт корня n -й степени. Механизм расчета функции желательности основан в кодировании натурального частного параметра y в желательность d , реализовать которое возможно с односторонним и двухсторонним ограничением. Одностороннее ограничение представляется наиболее достоверным, т. к. позволяет дать оценку многофакторных и разнопараметрических технических средств и подходов [13, 16, 20]. Данная функция имеет вид $x \leq x_{\max}$ или $x \geq x_{\min}$, т.е. параметр y имеет либо возрастающую, либо убывающую природу относительно некоторого заданного максимального или минимального значения. Расчет значений y выражается:

$$d = e^{-e^{-y'}}, \quad (2)$$

где d – частная функция желательности; y' – кодированное значение частного параметра y , вычисляемое по формуле:

$$y' = b_0 + b_1 x + b_2 x^2, \quad (3)$$

где b_0, b_1, b_2 – коэффициенты квадратичной функции.

Прологарифмировав дважды уравнение (3), получим:

$$y' = -\ln\left(\ln\frac{1}{a}\right) = \ln\frac{1}{\ln\frac{1}{a}}. \quad (4)$$

Подставляя значения y в уравнение (4), получим:

$$b_0 + b_1x + b_2x^2 = \ln\frac{1}{\ln\frac{1}{a}}. \quad (5)$$

Для известных значений составляется система уравнений, из которой определяются неизвестные коэффициенты линейной функции b_0, b_1, b_2 :

$$\begin{cases} b_0 + b_1x + b_2x^2 = \ln\frac{1}{\ln\frac{1}{0,81}} \\ b_0 + b_1x + b_2x^2 = \ln\frac{1}{\ln\frac{1}{0,63}} \\ b_0 + b_1x + b_2x^2 = \ln\frac{1}{\ln\frac{1}{0,37}} \end{cases} \quad (6)$$

Результатом описанных выше преобразований является система квадратичных уравнений, описывающих зависимости между исследуемым показателем и безразмерными значениями, что позволяет, используя систему (7), вычислить y для любого значения x в рассматриваемой области интереса, а далее по модели (3) – показатель желательности. Поскольку показатель желательности может иметь двустороннюю и одностороннюю природу ограничений, применительно к поставленной задаче наиболее рационально использовать функцию Харрингтона с односторонним ограничением, общий вид которой описан в работах [13, 16, 20]. Интерпретация значений интегрального показателя энергетической и экологической интенсивности технологических подходов утилизации органических отходов при их утилизации осуществляется в соответствии с градуировкой шкалы Харрингтона по следующим уровням предпочтений: «высокий» – $\geq 0,8$; «выше среднего» – $\geq 0,6$; «средний» – $\geq 0,37$; «ниже среднего» – $\geq 0,2$; «низкий» – > 0 . Значение обобщенной функции желательности D рассчитывается как среднее геометрическое всех участвующих в сравнении параметров:

$$D = \sqrt[n]{d(1) * d(2) * ... * d(n)}, \quad (7)$$

где n – число параметров используемых при сравнении технологических подходов.

Результаты и обсуждение. Анализ работ [5, 11, 24], результатов предварительных исследований [10, 11] позволил определить уровни желательности технологических подходов утилизации органических отходов животноводства, а также оценки, характеризующие предпочтительность их принадлежности с точки зрения энергетических затрат и экологического эффекта. В качестве параметров, определяющих энерго-экологическую желательность, были выбраны: удельные энергетические затраты, относительный уровень экологической безопасности, выражаемый соотношением числа колониеобразующих единиц патогенных форм до операционных воздействий и после, наличие пролонгированного бактерицидного эффекта. Представительность и достоверность выбранных параметров для формирования обобщённого интегрального показате-

ля желательности Харрингтона обусловлена результатами исследований [5, 11, 24]. На основании изложенного в таблице 2 представлены характеристики технологических подходов утилизации органических отходов при использовании функции желательности Харрингтона.

Таблица 2 – Характеристика желательности технологических подходов утилизации органических отходов

Table 2 – Characteristics of the desirability of technological approaches to the disposal of organic waste

№	Желательность d / Desirability d				
	Низкая / Low	Ниже средне-го / Below average	Средняя / Average	Выше средне-го / Above average	Высокая / High
1	0-0,20	0,21-0,37	0,38-0,63	0,64-0,80	0,81-1,0
2	Удельные затраты энергии y_1 , кВт*ч/м ³ / Specific energy consumption y_1 , kWh/m ³				
3	10	8	6	4	2
4	Относительный уровень экологической безопасности y_2 , % / Relative level of environmental safety y_2 , %				
5	25	45	70	85	100
6	Наличие пролонгированного бактерицидного эффекта y_3 , час. / The presence of a prolonged bactericidal effect y_3 , h.				
7	0	12	48	72	168

Проанализировав данные, приведённые в таблице 2, обобщающий интегральный показатель эффективности технологии утилизации органических отходов был рассчитан как среднее геометрическое частных желательностей с учетом ранжированных значений и корректировке, определяющей коэффициент значимости рассматриваемой совокупности, согласно методике [20], и представлен в таблице 3.

Таблица 3 – Соответствие натуральных и кодированных переменных желательности сравниваемых параметров технологическим подходам утилизации органических отходов

Table 3 – Correspondence of natural and coded desirability variables of the compared parameters to technological approaches to the disposal of organic waste

№	Параметр y_i / Parameter y_i	Желательность d_i / Desirability d_i		Номера соответствующих технологических подходов утилизации органических отходов / The numbers of the respective technological approaches to the disposal of organic waste
1	y_1	$d_1 = 0,80$	$x_1 = 4$	4
		$d_2 = 0,63$	$x_2 = 6$	2, 3, 5, 6, 7, 9
		$d_3 = 0,37$	$x_3 = 8$	1, 8
2	y_2	$d_1 = 0,80$	$x_1 = 85$	4
		$d_2 = 0,63$	$x_2 = 70$	1, 2, 3, 7, 8, 9
		$d_3 = 0,37$	$x_3 = 45$	5, 6
3	y_3	$d_1 = 0,80$	$x_1 = 72$	9
		$d_2 = 0,63$	$x_2 = 48$	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8
		$d_3 = 0,37$	$x_3 = 12$	4

Подставляя d_i и x_i в уравнение (3), получим систему уравнений для определения коэффициентов b_0 , b_1 , b_2 для каждого из параметров сравнения.

Для y_1 система примет вид:

$$\begin{cases} b_0 + 4b_1 + (4)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,80} \frac{1}{0,80}} \\ b_0 + 6b_1 + (6)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,63} \frac{1}{0,63}} \\ b_0 + 8b_1 + (8)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,37} \frac{1}{0,37}} \end{cases} \quad (8)$$

Для y_2 система примет вид:

$$\begin{cases} b_0 + 85b_1 + (85)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,80} \frac{1}{0,80}} \\ b_0 + 70b_1 + (70)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,63} \frac{1}{0,63}} \\ b_0 + 45b_1 + (45)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,37} \frac{1}{0,37}} \end{cases} \quad (9)$$

Для y_3 система примет вид:

$$\begin{cases} b_0 + 72b_1 + (72)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,80} \frac{1}{0,80}} \\ b_0 + 48b_1 + (48)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,63} \frac{1}{0,63}} \\ b_0 + 12b_1 + (12)^2 b_2 = \ln \frac{1}{\ln_{0,37} \frac{1}{0,37}} \end{cases} \quad (10)$$

В результате решения полученных систем (8), (9), (10) методом Крамера были получены следующие коэффициенты для системы (8) и y_1 :

$$\begin{array}{l|l} b_0 = 2,840 \\ b_1 = -0,316 \\ b_2 = -0,005 \end{array} \quad y'_1 = 2,840 - 0,316x - 0,005x^2. \quad (11)$$

В результате решения системы (9) были получены следующие коэффициенты для y_2 :

$$\begin{array}{l|l} b_0 = 0,033 \\ b_1 = -0,021 \\ b_2 = -0,00045 \end{array} \quad y'_2 = 0,033 - 0,021x - 0,00045x^2. \quad (12)$$

В результате решения системы (10) были получены следующие коэффициенты для y_3 :

$$\begin{array}{l|l} b_0 = -0,163 \\ b_1 = -0,316 \\ b_2 = -0,00015 \end{array} \quad y'_3 = -0,163 + 0,012x + 0,00015x^2. \quad (13)$$

Получив квадратичные функции (11), (12), (13) характеризующие уровень желательности сравниваемых параметров, определим их частные, кодированные значения и обобщённые значения D для каждого из них. Расчётные значения искомых параметров представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры функции желательности сравниваемых параметров /

Table 4 – Parameters of the desirability function of the compared parameters

№	Параметр / Parameter		Значения / Values					
1	Удельные энергетические затраты y_1 / Specific energy consumption y_1	Значения частного параметра / Importance of the private option	2	4	5,5	8,4	9,5	10
		Кодированные значения частного параметра / Encoded values of a private parameter	-0,1378	-0,1115	-0,0909	-0,0493	-0,0329	-0,0253
		Частные функции желательности / Partial desirability functions	0,3173	0,3269	0,3344	0,3497	0,3557	0,3585
		Обобщенная функция желательности D_1 / Generalized desirability function D_1	0,3401					
2	Относительный уровень экологической безопасности y_2 / Relative level of environmental safety y_2	Значения частного параметра / Importance of the private option	25	45	70	85	95	100
		Кодированные значения частного параметра / Encoded values of a private parameter	0,2374	0,6933	1,4326	1,9666	2,3602	2,5684
		Частные функции желательности / Partial desirability functions	0,4544	0,6065	0,7876	0,8694	0,9099	0,9262
		Обобщенная функция желательности D_2 / Generalized desirability function D_2	0,7361					
3	Наличие пролонгированного бактерицидного эффекта y_3 / The presence of a prolonged bactericidal effect y_3	Значения частного параметра / Importance of the private option	0	12	48	72	124	168
		Кодированные значения частного параметра / Encoded values of a private parameter	-0,1629	0,0057	0,7721	1,4999	3,6722	6,1466
		Частные функции желательности / Partial desirability functions	0,3082	0,3700	0,6300	0,8000	0,9749	0,9979
		Обобщенная функция желательности D_3 / Generalized desirability function D_3	0,6183					

На рисунках 2...4 представлена графическая интерпретация функции желательности Харрингтона в виде зависимости расчётных значений частного параметра (таблица 4) от коэффициента желательности d , согласно градуировке, представленной в таблице 2.

Рисунок 2 – Функция желательности Харрингтона, характеризующая удельные энергетические затраты технологических подходов утилизации органических отходов

Figure 2 – The Harrington desirability function, which characterizes the specific energy costs of technological approaches to the disposal of organic waste

Рисунок 3 – Функция желательности Харрингтона, характеризующая относительный уровень экологической безопасности

Figure 3 – The Harrington desirability function, which characterizes the relative level of environmental safety

Рисунок 4 – Функция желательности Харрингтона, характеризующая наличие пролонгированного бактерицидного эффекта технологических подходов утилизации органических отходов

Figure 4 – The Harrington desirability function, which characterizes the presence of a prolonged bactericidal effect of technological approaches to the disposal of organic waste

Обобщив результаты, представленные на рисунках 2...4 и таблице 4, представим сравнение технологических подходов утилизации органических отходов в зависимости от уровня удельных энергетических затрат (кривая 1), относительного уровня экологической безопасности (кривая 2) и наличия пролонгированного бактерицидного эффекта (кривая 3) в рамках одной координатной плоскости рисунка 5, где по оси x обозначены номера технологических подходов (таблица 1), а по оси y величина интегрального показателя желательности d .

Рисунок 5 – Эффективность технологических подходов утилизации органических отходов по показателю желательности:
1 – Уровень энергетических затрат; 2 – Уровень экологической нагрузки; 3 – Наличие пролонгированного бактерицидного эффекта

Figure 5 – Efficiency of technological approaches to the disposal of organic waste in terms of desirability:
1 – The level of energy costs; 2 – The level of environmental load; 3 – The presence of a prolonged bactericidal effect

На основании проведённых расчётов, результаты которых представлены в таблицах 3, 4, анализа графической зависимости на рисунке 5, установлено, что интегральный показатель эффективности технологических подходов утилизации органических отходов, согласно шкале желательности Харрингтона, лежит в диапазоне 0,5...0,7 для подходов, утилизирующих отходы в органические удобрения с их интенсивным обеззараживанием. С точки зрения анализа удельных энергетических затрат, относительного уровня экологической безопасности и наличия пролонгированного бактерицидного эффекта перспективным является использование технологического подхода 9 с интенсивным обеззараживанием в электромагнитном активаторе, существенным образом, интенсифицирующим процесс биотрансформации жидких органических отходов животноводства в жидкое биоорганическое удобрение. Новизна и перспективность желательности подхода также подтверждается патентом РФ (№ 2726309 от 13.07.2020). Коэффициент желательности при этом составляет диапазон 0,55...0,63, что соответствует среднему уровню.

Выводы. На основании проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

– обоснована перспективность использования методов нечёткого моделирования принятия оптимального решения исследований многопараметрических и многофакторных объектов на примере функции желательности Харрингтона при поиске энергетически и экологически эффективного подхода утилизации органических отходов животноводства;

– доказана эффективность использования функции желательности Харрингтона при ранжировании подходов утилизации органических отходов животноводства на примере бесподстилочного навоза, в зависимости от уровня удельных энергетических затрат, относительного уровня экологической безопасности и наличия пролонгированного бактерицидного эффекта;

– оптимальным с точки зрения анализа рассматриваемых параметров являются подходы, использующие интенсивное обеззараживание при уровне желательности 0,55...0,63, в частности технологический подход 9, предусматривающий утилизацию жидких органических отходов в жидкое биоорганическое удобрение с использованием активатора обеззараживания, обеспечивающего наибольший энерго-экологический эффект относительно аналогов.

Развитием полученных результатов будет являться разработка инструментов цифровизации процесса оценки технологических подходов с использованием методов нечёткого моделирования, в частности функций желательности Харрингтона, а также инструментов машинного обучения и определения оптимальных параметров технических средств, обеспечивающих максимальный экологический эффект при минимальных энергетических затратах.

Библиографический список

1. Ахлюстин С. Б., Мельников А. В., Щербакова И. В. Нечётко-множественное моделирование обобщенных показателей опасности объектов топливно-энергетического комплекса // Вестник Воронежского института МВД России. 2018. № 3. С. 44-55.
2. Бисчоков Р. М. Анализ, моделирование и прогноз урожайности сельскохозяйственных культур для Кабардино-Балкарской Республики с использованием аппарата нечеткой логики // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2020. Т. 15. № 2. С. 123-133.
3. Бутусов О. Б., Дикусар В. В., Редикульцева Н. И. Нечеткие дифференциальные модели и их применение для математического моделирования сложных экологических систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 4 (28). С. 14-25.
4. Даев Ж. А., Султанов Н. З. Автоматизированный контроль влажности природного газа методами нечеткого моделирования при смешивании // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2018. № 5. С. 8-10.
5. 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.
6. Личман Г. И., Личман А. А. Оценка влияния качества внесения удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. № 5. С. 16-21.
7. Математические модели по прогнозированию баланса гумуса / С. В. Митрофанов [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнического университета им. П.А. Костычева. 2019. № 2 (42). С. 25-29.
8. Математические модели по рациональному формированию систем удобрения / С. В. Митрофанов [и др.] // Международный научный сельскохозяйственный журнал. 2019. № 2. С. 36-43.
9. Метод решения экологических проблем при обращении с навозом и помётом / А. Ю. Брюханов [и др.] // Молочнохозяйственный вестник. 2017. № 3 (27). С. 84-96.
10. Методика оценки уровня экологической нагрузки свиноводческих предприятий / Н. В. Бышов [и др.] // Известия нижеволжского агроуниверситетского комплекса. 2020. № 1 (57). С. 268-278.
11. 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.
12. Обоснование параметров машинной технологии приготовления органобактериальных удобрений / Г. И. Личман [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 1. С. 43-48.
13. Парфенова В. Е. Нечеткое регрессионное моделирование в задачах управления аграрным производством // Инновации. 2019. № 7 (249). С. 88-92.

14. Повышение эффективности орошения на основе внедрения цифровых моделей прогнозирования водопотребления / Д. А. Соловьев [и др.] // Известия НВ АУК. 2020. № 4(60). С. 402-414.
15. Ракутько С. А., Ракутько Е. Н. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13. № 3. С. 11-17.
16. Сидельников К. А., Куприянов М. С., Сенилов М. А. Нечеткий метод определения материального баланса для моделирования процессов разработки месторождений углеводородов // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. 2018. Т. 1. С. 19-22.
17. Теория и технологии управления орошением сельскохозяйственных культур на основе информационных технологий поддержки принятия решений и математического моделирования / К. Е. Токарев [и др.] // Известия НВ АУК. 2020. № 4(60). С. 433-448.
18. Тимофеев Е. В., Эрк А. Ф., Судаченко В. Н. Оптимизация схем энергоснабжения современных сельскохозяйственных предприятий // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 1 (94). С. 63-71.
19. Уварова Л. В. Результаты имитационного моделирования системы водоотведения при использовании нечетких моделей // Водоочистка. 2018. № 3. С. 23-26.
20. Храмченкова А. О., Ракул Е. А. Интегральная оценка эффективности труда в молочном скотоводстве // Экономика труда. 2019. Том 6. № 1. С. 305-320.
21. Цифровые технологии в проектировании систем удобрения в сельскохозяйственных предприятиях / С. В. Митрофанов [и др.] // Техника и оборудование для села. 2019. № 7 (265). С. 14-17.
22. Шалавина Е. В., Васильев Э. В. Алгоритм принятия решений при выборе машинных технологий биоконверсии отходов животноводства // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 1 (17). С. 366-370.
23. Шаталова О. М. Основные положения методики информационного обеспечения в оценке эффективности технологических инноваций методами нечеткого моделирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. 2018. Т. 12. № 4. С. 102-112.
24. Ecological and technological criteria for the efficient utilization of liquid manure / N. V. Byshov, I. A. Uspensky, I. A. Yukhin, N. V. Limarenko // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. № 422 (012069).

Conclusion. Based on the study, the following conclusions can be drawn:

- the prospect of using fuzzy modeling methods for making the optimal decision for researching multivariate and multifactorial objects has been substantiated, using the example of Harrington's desirability function when searching for an energetically and environmentally effective approach to recycling organic animal waste;
- the effectiveness of using the Harrington desirability function has been proven when ranking approaches to utilization of organic waste from animal husbandry, using the example of liquid manure, depending on the biotransformation intensity;
- technology 9 is optimal from the point of view of the intensity of biotransformation, which provides for the utilization of liquid organic waste into liquid bioorganic fertilizer and the use of a disinfection activator that provides the highest intensity relative to analogs from the time and energy points of view.

The development of the results obtained will be the improvement of tools for digitalizing the process of evaluating technological approaches using fuzzy modeling methods, in particular Harrington desirability functions, as well as machine learning tools and determining the optimal parameters of technical means that ensure maximum environmental effect at minimum energy costs.

References

1. Akhlyustin S. B., Melnikov A. V., Shcherbakova I. V. Fuzzy set modeling generalized indicators of the danger of the fuel and energy complex // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2018. № 3. P. 44-55.

2. Bischokov R. M. Fuzzy logic device for crop analysing, modeling and forecasting in the Kabardino-Balkarian Republic // RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries. 2020. V. 15. № 2. P. 123-133.
3. Butusov O. B., Dikisar V. V., Redikul'tseva N. I. Fuzzy differential models and their application for mathematical modeling of complex ecological systems // Reliability and quality of complex systems. 2019. № 4 (28). P. 14-25.
4. Daev Z. A., Sultanov N. Z. Automated control of humidity of natural gas by methods of fuzzy modeling at mixing // Devices and systems. Management, control, diagnostics. 2018. № 5. P. 8-10.
5. Conceptual Model of Energy Efficiency for Environmentally Safe Utilization of Liquid Pig Manure / N. V. Byshov [et al.] // Engineering Technologies and Systems. 2020. V. 30(3). P. 394-412.
6. Lichman G. I., Lichman A. A. Assessment of influence of fertilization quality on crop yield // Agricultural Machinery and Technologies. 2017. № 5. P. 16-21.
7. Mathematical models for humus balance forecasting / S. V. Mitrofanov [et al.] // Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo Universiteta im. P. A. Kostycheva. 2019. № 2 (42). P. 25-29.
8. Mathematical models for the rational development of fertilizer systems / S. V. Mitrofanov [et al.] // International Scientific Agricultural Journal. 2019. № 2 (42). P. 36-43.
9. Method of solving ecological problems when handling manure and droppings / A. Yu. Bryukhanov [et al.]. 2017. No. 3 (27). P. 84-96.
10. Assessment methodology of environmental load level of pig breeding enterprises / N. V. Byshov [et al.] // Proc. of the Lower Volga AgroUniversity Comp. 2020. V. 1(57). P. 268-278.
11. Modeling of the epidemiological properties of liquid manure during its preparation by physico-chemical disinfection / A. A. Tsymbal [et al.] // Vestnik Ryazanskogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva. 2020. № 3. P. 89-98.
12. Justification of parameters of machine technology of organo-bacterial fertilizers preparation / G. I. Lichman [et al.] // Agricultural Machinery and Technologies. 2016. № 1. P. 43-48.
13. Parfenova V. E. Fuzzy regression modeling in tasks of management of agrarian production // Innovation. 2019. № 7 (249). P. 88-92.
14. Improving irrigation efficiency based on introducing of digital models for forecasting water consumption / D. A. Solovyev [et al.] // Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp. 2020. № 4 (60). P. 402-414.
15. Rakutko S. A., Rakutko E. N. Simulation and Numerical Analysis of Energy-and-Ecological Compatibility of Indoor Plant Lighting // Agricultural Machinery and Technologies. 2019. V. 13(3). P. 11-17.
16. Sidelnikov K. A., Kupriyanov M. S., Senilov M. A. Fuzzy material balance method to model hydrocarbon field development // International Conference on Soft Computing and Measurements 2018. V. 1. P. 19-22.
17. Theory and technologies of irrigation control for crops based on information technologies decision support and mathematical modeling / K. E. Tokarev [et al.] // Proc. of the Lower Volga Agro-University Comp. 2020. V. 4(60). P. 433-448.
18. Timofeev E. V., Erk A. F., Sudachenko V. N. Optimization of power supply schemes of modern agricultural enterprises // Technology and technical means of mechanized production of crop and livestock products. 2018. № 1 (94). P. 63-71.
19. Uvarova L. V. Results of imitation modeling of the drainage system using fuzzy models // Vodoochistka. 2018. № 3. P. 23-26.
20. Khranchenkova A. O., Rakul E. A. Integral assessment of labor efficiency in dairy cattle // Labor Economics. 2019. V. 6 (1). P. 305-320.
21. Digital technologies in the design of fertilizer systems at agricultural enterprises / S. V. Mitrofanov [et al.] // Rural machinery and equipment. 2019. No. 7 (265). P. 14-17.
22. Shalavina E. V., Vasiliev E. V. Decision-making algorithm for choosing machine technologies for bioconversion of animal waste // Bulletin of the Agroindustrial Complex of Stavropol. 2015. No. 1 (17). P. 366-370.

23. Shatalova O. M. Main provisions of the technique of information support in assessing the efficiency of technological innovations using fuzzy modeling methods // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Economics and Management. 2018. Vol.12. No. 4. P. 102-112.

24. Ecological and technological criteria for the efficient utilization of liquid manure / N. V. Byshov [et al.] // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. № 422 (012069).

Authors Information

Sergei N. Borychev, head of the department of construction of engineering structures and mechanics of the Ryazan agrotechnological University named after p. A. Kostychev (390044, Russia, Ryazan, Kostycheva str., 1), doctor of technical Sciences, Professor, Researcher ID: B-8415-2019; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9726-3584>, 89066486088@mail.ru

Nikolay V. Limarenko, associate Professor of the Department of electrical engineering and electronics, Don State Technical University (344000, Russia, Rostov-on-don, Gagarin square, 1), candidate of technical Sciences, Researcher ID: O-5342-2017; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3075-2572>, limarenkodstu@yandex.ru

Elena A. Rakul, associate Professor of the Department mathematics, physics, and computer science of the Bryansk State Agrarian University (243365, Russia, Bryansk region, Vygonichsky district, Kokino village, Sovetskaya str. 2a), candidate of technical Sciences, Researcher ID: AAC-9211-2021; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7667-961X>; wmf@bgsha.com

Ivan A. Uspenskiy, head of the Department of technical operation of transport of the Ryazan agrotechnological University named after p. A. Kostychev (390044, Russia, Ryazan, Kostycheva str., 1), doctor of technical Sciences, Professor, Researcher ID: B-7990-2019; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4343-0444>; ivan.uspensckij@yandex.ru

Ivan A. Yukhin, head of the Department of automotive engineering and heat power ENGINEERING of the p. A. Kostychev Ryazan agrotechnological University (1, Kostycheva str., Ryazan, 390044, Russia), doctor of technical Sciences, associate Professor, Researcher ID: Q-8188-2017; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3822-0928>, ivan.uspensckij@yandex.ru

Kristina V. Khokhlova, student of Don State Technical University (344000, Russia, Rostov-on-don, Gagarin square, 1), Researcher ID: AAD-3365-2021; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-3075-9524>, cristy2020@yandex.ru

Информация об авторах

Борычев Сергей Николаевич, заведующий кафедрой «Строительство инженерных сооружений и механика» ФГБОУ ВО «Рязанский агротехнологический университет имени П.А. Костычева» (390044, Россия, г. Рязань, ул. Костычева, д.1), доктор технических наук, профессор, Researcher ID: B-8415-2019; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9726-3584>, 89066486088@mail.ru

Лимаренко Николай Владимирович, доцент кафедры «Электротехника и электроника» 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

Ракул Елена Анатольевна, доцент кафедры автоматики, физики и математики ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет» (243365, Россия, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино, ул. Советская 2а), кандидат технических наук, Researcher ID: AAC-9211-2021; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7667-961X>; wmf@bgsha.com

Успенский Иван Алексеевич, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация транспорта» ФГБОУ ВО «Рязанский 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>; ivan.uspensckij@yandex.ru

Юхин Иван Александрович, заведующий кафедрой «Автотракторная техника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Рязанский 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>, ivan.uspensckij@yandex.ru

Хохлова Кристина Владимировна, студентка ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), Researcher ID: AAD-3365-2021; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-3075-9524>, cristy2020@yandex.ru