

Оценка энергетических, ресурсосберегающих, экологических, продуктовых и экономических потенциалов продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных

© 2024. Б. В. Ермоленко, к. т. н., доцент, М. С. Прутских, аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, 125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9, e-mail: bermol@mail.ru, maxim.prutskikh@yandex.ru

Статья посвящена анализу экологических проблем обращения с продуктами жизнедеятельности сельскохозяйственных животных и энергетическому направлению их использования с получением в качестве побочной продукции высококачественных органических удобрений. Проводимый анализ поголовья основных видов сельскохозяйственных животных в различных регионах Российской Федерации позволяет оценить годовые объёмы образования продуктов их жизнедеятельности с применением соответствующих удельных показателей. Эта информация ложится в основу определения массы выбросов различных загрязняющих веществ в атмосферу (включая парниковые газы), попадания загрязнённых сточных вод в водные объекты, размещения отходов на отгораемых из оборота сельскохозяйственных землях в процессах образования и хранения навоза, помёта и навозных сточных вод в животноводческих хозяйствах. В качестве возможного направления утилизации отходов с целью снижения их воздействия на окружающую среду и решения задач ресурсосбережения выбирается получение биогаза, тепловой и электрической энергии, высококачественных органических удобрений. Инвестиционное проектирование биогазовых энергетических комплексов и разработка региональных программ развития возобновляемой энергетики требует проведения эколого-экономического обоснования. Его информационной основой является разработанная авторами статьи система топливных, электроэнергетических, теплоэнергетических, ресурсосберегающих, экологических, эколого-экономических, экономических и продуктовых потенциалов. Представлена пошаговая методика их оценки, для которой использовалась информационно-вычислительная система, созданная на кафедре промышленной экологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева. Система предназначена для оценки потенциалов солнечной и ветровой энергетики, энергетического использования различных видов отходов, растительной биомассы и других видов возобновляемых источников энергии. Рассчитаны потенциалы энергетического использования продуктов жизнедеятельности животных для различных видов животноводства с дифференциацией по районам, субъектам и федеральным округам России. Имея эту информацию, каждая отдельная административно-территориальная единица может провести эколого-экономическое обоснование инвестирования средств в программы утилизации продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных.

Ключевые слова: сельскохозяйственные животные, продукты жизнедеятельности, оценка, потенциалы (топливный, электроэнергетический, теплоэнергетический, ресурсосберегающий, экологический, экономический, продуктовый), информационно-вычислительная система.

Assessment of energy, resource saving, environmental, product and economic potential of farm animal products

© 2024. B. V. Ermolenko ORCID: 0000-0003-2703-6102
M. S. Prutskikh ORCID: 0000-0003-0184-294X
Russian University of Chemical Technology D. I. Mendeleev,
9, Miusskaya Square, Moscow, Russia, 125047,
e-mail: bermol@mail.ru, maxim.prutskikh@yandex.ru

The paper is devoted to the analysis of environmental problems of farm animal waste management and the energy direction of their use to obtain high-quality organic fertilizers as by-products. The analysis of the population of the main types of farm animals in various regions of the Russian Federation allows us to estimate the annual volumes of formation of their vital products using appropriate specific indicators. This information forms the basis for determining the mass of emissions of various pollutants into the atmosphere (including greenhouse gases), contaminated wastewater into water bodies, waste disposal on agricultural land rejected from circulation in the processes of formation and storage of manure, litter and manure wastewater in livestock farms. The results of the calculations indicate the significance of the environmental damage caused. Calculations were performed using certified techniques and software products. The production of biogas, thermal and electric energy, and high-quality organic fertilizers is chosen as a possible direction of waste disposal in order to reduce their impact on the environment and solve resource-saving problems. The investment design of biogas

energy complexes and the development of regional renewable energy development programs require an environmental and economic justification. Its information basis is the system of fuel, electric power, thermal energy, resource-saving, ecological, ecological-economic, economic and product potentials developed by the authors of this paper. A step-by-step methodology for their assessment is presented. Information and computing system created at the Department of Industrial Ecology of the D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology was used for the assessment. The system is designed to assess the potentials of solar and wind energy, energy use of various types of waste, plant biomass and other types of renewable energy sources. The potentials of energy utilization of farm animal waste products for various types of animal husbandry with differentiation by regions, subjects and federal districts of Russia have been calculated. With this information, each separate administrative-territorial unit can carry out an ecological and economic justification of investment in programs of farm animal waste products utilization.

Keywords: farm animals, waste products, assessment, potentials (fuel, electric power, thermal energy, resource-saving, environmental, economic, product), information and computing system.

Животноводство – одна из активно развивающихся отраслей народного хозяйства на территории Российской Федерации (РФ). В качестве основных направлений деятельности в отрасли выступают скотоводство, овцеводство, свиноводство и птицеводство. Животноводство призвано обеспечить страну продуктами питания, сырьём для пищевой промышленности, мехом, кожей, шерстью, пухом, костной мукой, тягловой силой, органическим удобрением. Решение этих проблем осуществляется наращиванием и поддержанием поголовья скота в хозяйствах разных категорий. На конец 2022 г. в хозяйствах всех категорий поголовье крупного рогатого скота (КРС) составляло 17,49 млн голов, свиней – 27,61 млн голов, овец и коз – 19,08 млн голов, птицы – 551 млн голов, а в сельскохозяйственных организациях – 7,96 млн голов КРС, 25,65 млн голов свиней, 3,17 млн голов овец и коз, птицы – 470 млн голов [1].

Содержание и откорм сельскохозяйственных животных сопровождаются значительным негативным воздействием на окружающую среду (ОС). Животноводческие комплексы являются источниками локального загрязнения атмосферы такими загрязняющими веществами (ЗВ), как аммиак, сероводород, фенолы, спирты, сложные эфиры, карбонильные соединения, карбоновые кислоты, сульфиды и дисульфиды, меркаптаны, амины, диоксид углерода, пыль животного происхождения [2] и другими продуктами жизнедеятельности животных, зачастую обладающими крайне неприятными запахами.

На крупных животноводческих фермах и в комплексах скапливается большое количество навоза и растительной подстилки. В соответствии с Федеральным классификационным каталогом отходов [3] класс опасности отходов животноводства (продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных) зависит от степени их свежести (табл. 1).

По оценкам Национальной мясной ассоциации [4], в 2020 г. в животноводческих хозяйствах всех категорий образовалось около 300 млн т навоза и помёта, в том числе примерно 180 млн т – в сельскохозяйственных организациях и крестьянских фермерских хозяйствах. Половина из этого количества не используется в сельском хозяйстве. Под хранение неиспользуемого навоза уже сейчас занято более 2 млн га сельскохозяйственных земель [5], которые подвергаются химической деградации под воздействием продуктов жизнедеятельности (ПЖ) сельскохозяйственных животных.

Одной из наиболее неприятных проблем, связанных с функционированием животноводческих комплексов и обращением с ПЖ сельскохозяйственных животных, является образование и попадание в атмосферу большого количества таких парниковых газов (ПГ), как метан (CH_4), оксид азота (N_2O) и CO_2 . Выбросы парниковых газов от предприятий сельскохозяйственного производства на территории РФ в 2021 г. составили 121,3 млн т CO_2 -экв [6] или 5,6% от общего годового выброса ПГ страны. В аграрном секторе в качестве источников выбросов ПГ выступают: побочный продукт пищеварения (CH_4), образующийся при ферментации пищи в желудках травоядных животных; системы сбора, хранения и использования навоза и птичьего помёта (выбросы CH_4 , CO_2 и N_2O); сельскохозяйственные земли после внесения в них навоза в качестве удобрения (выбросы N_2O); рисовые поля; известкование и внесение карбамида в почвы.

Из опыта многих стран известно, что переработка навоза и птичьего помёта посредством анаэробного брожения с получением биогаза, органических удобрений, тепловой и электрической энергии экологически и экономически выгодны [7, 8]. В этом процессе происходит удаление ПЖ сельскохозяйственных животных из сферы обращения с отходами с соответ-

Таблица 1 / Table 1

Классы опасности продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных
Hazard classes of farm animal waste products

Наименование продукта жизнедеятельности сельскохозяйственных животных (отходов) / Name of farm animals waste products	Класс опасности Hazard classes
Навоз крупного рогатого скота (КРС) свежий / Fresh cattle manure	IV
Навоз КРС перепревший / Rotted cattle manure	V
Отходы подстилки при содержании КРС / Waste litter from cattle housing	IV
Стоки навозные от содержания КРС обеззараженные Disinfected manure effluent from cattle housing	IV
Навоз мелкого рогатого скота свежий / Fresh small cattle manure	IV
Навоз мелкого рогатого скота перепревший / Rotted small cattle manure	V
Навоз свиней свежий / Fresh pig manure	III
Навоз свиней перепревший / Rotted pig manure	IV
Отходы подстилки из древесных опилок при содержании свиней Waste litter from sawdust in pig farming	IV
Жидкая фракция сепарации свиного навоза Liquid fraction of pig manure separation	IV
Помёт куриный свежий / Fresh chicken manure	III
Помёт куриный перепревший / Rotted chicken manure	IV
Помёт куриный, выдержанный в помётохранилище, обеззараженный Chicken manure, aged in a manure storage facility, disinfected	IV

ствующим снижением всех видов негативного воздействия на ОС, включая запахи, выбросы метана и закиси азота, отторжение земель под хранение. Биодобриения повышают урожайность и обеспечивают эффективность инвестирования средств, а энергия от сжигания биогаза может быть востребована производителем и другими потребителями.

Развитие на территории страны эффективных систем энергоснабжения на базе ПЖ сельскохозяйственных животных требует проведения эколого-экономического обоснования целесообразности создания таких систем в соответствующих регионах и применения оптимизационных методов их проектирования на стадии обоснования инвестиций. В литературе отсутствует информация о пошаговой методике оценки энергетических, топливных, ресурсосберегающих, экологических, экономических и продуктовых потенциалов применительно к использованию этого вида энергетического ресурса.

Поэтому целью исследования являлась разработка методики оценки таких потенциалов для проведения эколого-экономического обоснования инвестирования средств в строительство биогазовых энергетических комплексов по переработке ПЖ сельскохозяйственных животных, выбора оптимальных направлений инвестирования средств в региональные программы использования

побочных продуктов животноводства и развития возобновляемой энергетики.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования. В качестве объектов исследования выступают энергия биомассы, образующейся в процессе жизнедеятельности сельскохозяйственных животных, и получаемые при её использовании такие продукты, как биогаз, электрическая и тепловая энергия, высококачественные органические удобрения.

Потенциальные возможности использования биомассы для производства перечисленных выше продуктов предлагается оценивать с помощью топливного, теплоэнергетического, электроэнергетического потенциалов, потенциалов ресурсосбережения, а также экологических, продуктовых, экономических потенциалов ресурсосбережения и эколого-экономических потенциалов [9].

Ниже приводятся понятия потенциалов как показателей, характеризующих энергетическую, экономическую и экологическую целесообразность энергетического и продуктового использования биомассы ПЖ сельскохозяйственных животных. Оценка потенциалов дифференцируется по видам сельскохозяйственных животных, обитающих на территории районов, субъектов Федерации, федеральных округов и РФ в целом. Значения

потенциалов рассчитываются на годовом интервале времени.

Топливный потенциал энергетического использования биомассы оценивает величину годового потенциала её энергии в тоннах условного топлива в год (т у.т./г).

Теплоэнергетический потенциал оценивает количество тепловой энергии в Гкал/г, которое можно произвести путём преобразования энергии биомассы в тепло, и, соответственно, экономию тепловой энергии, получаемой при сжигании ископаемых органических топлив.

Электроэнергетический потенциал – количество электрической энергии в кВт·ч/г, получаемой при использовании энергии биомассы, а, следовательно, снижение расхода электрической энергии, производимой из ископаемых видов топлива.

Потенциал ресурсосбережения задаёт в натуральном выражении (т/год, тыс. м³/год) количество ископаемых видов топлива (газа, мазута, угля, дизельного топлива), которое пришлось бы использовать для получения энергии традиционными методами в количестве, соответствующем энергетическому потенциалу рассматриваемой биомассы.

Экологический потенциал (загрязнение атмосферы) – величина (т/г, т СО-экв./г, т СО₂-экв./г) предотвращаемых выбросов ЗВ в атмосферу (т/год), образующихся в топках электростанций и котельных в процессе сжигания газа, мазута, угля, дизельного топлива для получения энергии в количестве, соответствующем энергетическому потенциалу биомассы, с учётом снижения загрязнения атмосферы при прекращении размещения навоза на отторгаемых землях и увеличения загрязнения при производстве биогаза, энергии и удобрений. Экологический потенциал измеряется в т/г предотвращаемого выброса каждого из веществ и по приведённой массе оксида углерода, эквивалентной по воздействию на ОС массе всех выбрасываемых в атмосферу веществ, т. е. в т СО-экв./г. При необходимости можно оценить и предотвращение загрязнения водных объектов (т/г, т TiO₂-экв./г), и ОС при размещении отходов (т/г, т отх. IV кл.-экв./г).

Продуктовый потенциал – совокупность продуктов различного вида, сбалансированных по количеству и качеству, которые позволяют производить максимально возможный объём продукции при их рациональном использовании. Может, в частности, рассматриваться как количество производимых высококачественных удобрений (т/г) в процессе переработки биомассы.

Количество биогаза, тепловой и электрической энергии оценивается в соответствии с топливным, теплоэнергетическим и электроэнергетическим потенциалами.

Экономический потенциал ресурсосбережения – величина снижения (изменения) затрат на приобретение и транспортировку топлива и пресной воды в результате замещения традиционной тепловой энергетики на возобновляемую в соответствии с энергетическим потенциалом рассматриваемой биомассы (руб./г).

Эколого-экономический потенциал – величина предотвращаемого эколого-экономического ущерба и экологических платежей, а также доходов от продажи квот на выбросы ПГ при замещении на рассматриваемой территории генерирующих объектов традиционной тепловой энергетики на заданные объекты возобновляемой энергетики в соответствии с энергетическими и экологическими потенциалами рассматриваемой биомассы (руб./г).

Продуктовый экономический потенциал – изменение стоимости продуктов, получаемых из биомассы, в сравнении с их стоимостью в традиционном исполнении (руб./г).

Методики оценки потенциалов. Биомасса, потенциалы которой оцениваются, различаются по видам сельскохозяйственных животных, климатическим условиям, в которых они существуют, используемым кормам, растительным добавкам к перерабатываемому навозу и другим факторам. Количество её в регионе зависит от числа голов каждого вида животных и перечисленных выше факторов. Для определения количества образующихся ПЖ сельскохозяйственных животных, а также объёма производства биогаза, тепловой, электрической энергии и органических удобрений, необходимо обладать соответствующей исходной статистической и нормативной информацией.

Исходная информация для проведения оценки. Состав необходимой исходной информации и её источники представлены на рисунке 1.

При наличии статистических данных о поголовье скота каждого j -го вида в r -м регионе страны $N_{jr}^{(гол.ск)}$ (для $\forall r \in R^{рег}$ и $\forall j \in J_r^{(вид жив)}$) и информации о нормативах образования различных продуктов i -го вида в процессе жизнедеятельности животных на животноводческих комплексах $H_{ijr}^{обр отх}$ (т/(гол.·г)) легко

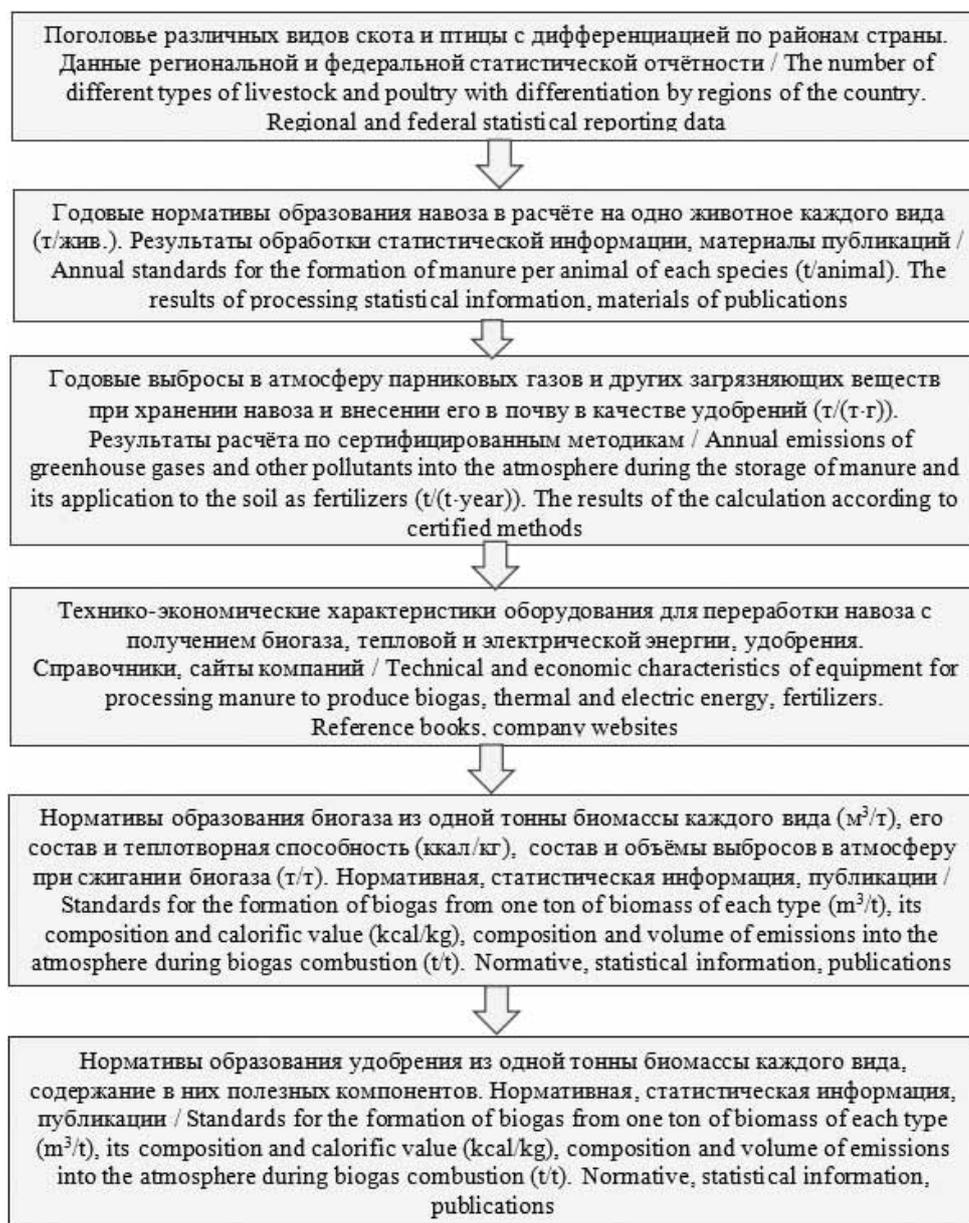


Рис. 1. Исходная информация для проведения оценки потенциалов
 Fig. 1. Background information for the capacity assessment

определяется годовое количество биомассы ПЖ i -го вида (для $\forall i \in I_{jr}^{\text{вид.отх}}$), образующихся в течение года от жизнедеятельности животных j -го вида на территории r -го региона, т/г:

$$m_{ijr}^{\text{биотх}} = N_{ijr}^{\text{оборотх}} \cdot N_j^{\text{тол.ск}} \quad (1)$$

Зная объёмы образования биогаса $N_{ijr}^{\text{обр.биогаз}}$ (тыс. м³/т) из одной тонны i -го рассматриваемой биомассы, можно оценить годовой объём производства биогаса, тыс. м³/г:

$$V_{ijr}^{\text{биогаз}} = N_{ijr}^{\text{обр.биогаз}} \cdot m_{ijr}^{\text{биотх}} \quad (2)$$

Анализ состава i -го биогаса позволяет оценить его теплотворную способность $q_i^{\text{биогаз}}$ ккал/м³ для $\forall i \in I_{jr}^{\text{вид.отх}}$.

Топливный потенциал. Информация о теплотворной способности биогаса из i -го вида биомассы применяется для оценки величины его топливного потенциала, а, следовательно, и самой i -й биомассы. Коэффициент пересчёта количества i -го биогаса в эквивалентное количество условного топлива рассчитывается как:

$$k_{i\text{тту}}^{\text{биогаз}} = q_i^{\text{биогаз}} / q_{\text{усл}}^{\text{топл}} \quad (3)$$

где $q_{\text{усл}}^{\text{топл}}$ – теплотворная способность условного топлива (7000 ккал/кг).

Топливный потенциал оценивается для:
 а) биомассы i -го вида, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных j -го вида в r -м регионе, т у.т./г:

$$M_{jr}^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall i \in I_{\text{вид жив}}} \cdot M_{jir}^{\text{топл пот}} \quad (4)$$

б) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных j -го вида в r -м регионе, т у.т./г:

$$M_{jr}^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall i \in I_{\text{вид жив}}} \cdot M_{jir}^{\text{топл пот}} \quad (5)$$

в) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных в r -м регионе, т у.т./г:

$$M_r^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall j \in J_r} \cdot M_{jir}^{\text{топл пот}} \quad (6)$$

г) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных в s -м субъекте федерации, т у.т./г:

$$M_s^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall r \in R_s} \cdot M_r^{\text{топл пот}} \quad (7)$$

д) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных в f -м федеральном округе, т у.т./г:

$$M_f^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall s \in S_f^{\text{суб.фед}}} \cdot M_s^{\text{топл пот}} \quad (8)$$

е) всей биомассы, образовавшейся от жизнедеятельности домашних животных на всей территории РФ, т у.т./г:

$$M_{\text{РФ}}^{\text{топл пот}} = \sum_{\forall f \in F_{\text{РФ}}} \cdot M_f^{\text{топл пот}} \quad (9)$$

Теплоэнергетический потенциал биотхода i -го вида, образовавшегося от жизнедеятельности домашних животных j -го вида в r -м регионе (Гкал/г) оценивается по величине топливного потенциала $M_{jir}^{\text{топл пот}}$ с использованием коэффициента пересчёта Гкал тепловой энергии в т у.т. – [10]:

$$k_{\text{тут}}^{\text{тепл эн}} = 0,1486^{\text{т у.т}} / \text{Гкал} \quad (10)$$

$$Q_{ijr}^{\text{тепл эн пот}} = M_{jir}^{\text{топл пот}} / k_{\text{тут}}^{\text{тепл эн}}$$

Аналогично рассчитываются топливные потенциалы $Q_{jr}^{\text{тепл эн пот}}$, $Q_r^{\text{тепл эн пот}}$, $Q_s^{\text{тепл эн пот}}$, $Q_f^{\text{тепл эн пот}}$, $Q_{\text{РФ}}^{\text{тепл эн пот}}$.

Электроэнергетический потенциал оценивается по той же схеме, но с применением коэффициента пересчёта:

$$k_{\text{тут}}^{\text{эл эн}} = 0,3445 \text{ т у.т.} / \text{тыс.кВт} \cdot \text{ч}$$

$$W_{ijr}^{\text{эл эн пот}} = M_{jir}^{\text{топл пот}} / k_{\text{тут}}^{\text{эл эн}}, \text{ тыс.кВт} \cdot \text{ч} / \text{Г} \quad (11)$$

и таким же образом электроэнергетические потенциалы $W_{jr}^{\text{эл эн пот}}$, $W_r^{\text{эл эн пот}}$, $W_f^{\text{эл эн пот}}$, $W_s^{\text{эл эн пот}}$, $W_{\text{РФ}}^{\text{эл эн пот}}$.

Потенциалы ресурсосбережения могут быть определены либо по средним для России показателям теплотворной способности природного газа, угля, мазута и дизельного топлива с помощью официальных коэффициентов пересчёта $k_{\text{т ср тту}}^{\text{топл}}$ [10] или с применением информации о теплотворной способности ископаемого топлива каждого из месторождений и видов используемых мазутов и дизельного топлива для расчёта коэффициентов $k_{\text{т ср тту}}^{\text{топл}} = q_t^{\text{топл}} \cdot q_{\text{усл}}^{\text{топл}}$. В общем случае, количество сэкономленного t -го топлива при замещении его биогазом, произведённым из биомассы i -го вида, образовавшейся в результате жизнедеятельности j -х домашних животных в r -м регионе, получают по той же формуле:

$$M_{ijr}^{\text{рес сб пот}} = M_{jir}^{\text{топл пот}} / k_{\text{тту}}^{\text{топл}}, \text{ т} / \text{Г}. \quad (12)$$

Оцениваются и объёмы ресурсосбережения по отдельным видам сельскохозяйственных животных в регионе их разведения $M_{tir}^{\text{рес сб пот}}$ и общие показатели экономии топлива на территории административных единиц разного уровня $M_{tr}^{\text{рес сб пот}}$, $M_{ts}^{\text{рес сб пот}}$, $M_{tf}^{\text{рес сб пот}}$, $M_{t\text{РФ}}^{\text{рес сб пот}}$.

Экологические потенциалы. Если ориентироваться на экологические потенциалы, связанные с уменьшением загрязнения атмосферы при энергетическом использовании ПЖ сельскохозяйственных животных при замещении произведённым биогазом топлива t -го вида, то они задаются двумя способами: в виде массы предотвращённых выбросов каждого v -го ЗВ в т/г и в виде приведённой массы веществ локального загрязнения в т СО-экв./г и приведённой массы ПГ в т СО₂-экв./г. При этом следует учитывать, что для каждого v -го вещества необходимо оценивать его массу $\Delta M_{vtijr}^{\text{ЗВ ттоп}}$ (т/г), которая могла бы попасть в атмосферу при сжигании t -го топлива, массу его выбросов $\Delta M_{vijr}^{\text{ЗВ ут биоотх}}$ (т/г), которые были предотвращены в результате утилизации биомассы, и загрязнение атмосферы $M_{vijr}^{\text{ЗВ биогаз.ст}}$ (т/г), сопровождающее работу биоэнергетических установок:

$$M_{vtijr}^{\text{экол пот}} = \Delta M_{vtijr}^{\text{ЗВ ттоп}} + \Delta M_{vijr}^{\text{ЗВ ут биоотх}} - M_{vijr}^{\text{ЗВ биогаз.ст}} \quad (13)$$

Масса предотвращённых выбросов и выбросов от биостанций рассчитывается на основе удельных показателей выбросов ЗВ при сжигании t -х видов ископаемых органических топлив в котлах тепловых электростанций и котельных на 1 кВт·ч выработанной энергии $H_{vt}^{выбр\ ЗВ\ ттоп}$ (т/кВт·ч), при функционировании животноводческих комплексов на 1 т образующихся ПЖ животных $H_{vt}^{выбр\ ЗВ\ жив\ компл}$ (т/т), при работе биогазовой станции на 1 кВт·ч производимой электрической энергии $H_{v,биогаз}^{выбр\ ЗВ\ ттоп}$ (т/кВт·ч). Для расчёта удельных показателей выделения (выбросов) используются соответствующие сертифицированные методики и программные продукты [2, 11, 12]. Для оценки составляющих экологического потенциала удельные показатели выбросов умножаются соответственно на электроэнергетический потенциал биомассы $10^{-3} \cdot W_{ijr}^{эл\ эн\ пот}$ объём их образования $m_{ijr}^{биоотх}$ и количество производимой из биогаза электрической энергии $10^{-3} \cdot W_{ijr}^{эл\ эн\ пот}$:

$$M_{vtijr}^{экол\ пот} = H_{vt}^{выбр\ ЗВ\ ттоп} \cdot 10^{-3} \cdot W_{ijr}^{эл\ эн\ пот} + H_{vt}^{выбр\ ЗВ\ жив\ компл} \cdot m_{ijr}^{биоотх} - 10^{-3} \cdot W_{ijr}^{эл\ эн\ пот} \cdot H_{v,биогаз}^{выбр\ ЗВ\ ттоп} \quad (14)$$

Комплексный локальный экологический потенциал замещения t -го вида топлива на биогаз, производимый из отходов животноводства, для производства энергии оценивается для загрязнения атмосферы в т СО-экв. как:

$$M_{CO_{2ijr}}^{экол\ пот} = \sum \forall_{v \in V_{зв}} A_v^{атм} \cdot M_{vtijr}^{экол\ пот} \quad (15)$$

где $A_v^{атм}$ – коэффициент относительной агрессивности v -го ЗВ в атмосферном воздухе [13], равный:

$$A_v^{атм} = \left(\frac{ПДК_{CO} \times ПДК_{рзCO}}{ПДК_{ccv} \times ПДК_{рзv}} \right)^{0,5} \cdot \alpha \cdot \delta \cdot \lambda \cdot \beta, \quad (16)$$

где $\alpha, \delta, \lambda, \beta$ – поправочные коэффициенты.

Комплексный глобальный экологический потенциал (по ПГ) замещения t -го вида топлива на биогаз, производимый из отходов животноводства, для производства энергии оценивается в т СО₂-экв. как:

$$M_{CO_2ijr}^{экол\ пот} = \sum \forall_{v \in V_{зв}} k_{vCO_2-экв}^{ПГ} \cdot M_{vtijr}^{экол\ пот}, \quad (17)$$

где $k_{vCO_2-экв}^{ПГ}$ – коэффициент пересчёта массы v -го ПГ в т СО₂-экв.

Масса предотвращённых сбросов и сбросов от биоэнергетических станций рассчитывается по сходному алгоритму для каждого ЗВ в отдельности и для всех веществ в эквивалент-

ных по воздействию на окружающую среду тоннах диоксида титана – т TiO₂-экв./г [13]. В этом случае коэффициент относительной агрессивности $A_v^{вод}$ для сброса в водные объекты v -го ЗВ определяется как:

$$A_v^{вод} = ПДК_{рхTiO_2} / ПДК_{рхv} \quad (18)$$

Экологический потенциал, связанный с предотвращением размещения отходов, оценивается как отдельно по классам их опасности, так и суммарно в тоннах эквивалентного по воздействию отхода IV класса опасности. Здесь коэффициент относительной агрессивности отходов k -го класса опасности может быть задан отношением ставок экологических платежей k -го класса $\tilde{Пл}_k^{отх}$ и IV класса опасности $\tilde{Пл}_{IV}^{отх}$ в ценах базового года (например, 2018 г.):

$$A_k^{отх} = \tilde{Пл}_k^{отх} / \tilde{Пл}_{IV}^{отх} \quad (19)$$

Значения всех экологических потенциалов по видам животных и для разных административно-территориальных единиц могут быть получены суммированием потенциалов $M_{vtijr}^{экол\ пот}$, $M_{CO_{2ijr}}^{экол\ пот}$, $M_{CO_2tjgr}^{экол\ пот}$ по $\forall i \in I_{jgr}^{вид\ отх}$, $\forall j \in J_r^{вид\ жив}$, $\forall r \in R_s^{рег}$, $\forall f \in F_{рф}^{фед\ окр}$, $\forall f \in F_{рф}^{фед\ окр}$.

Продуктовые потенциалы. Исходный продуктовый потенциал соответствует количеству удобрений, произведённых из отходов животноводческого комплекса:

$$M_{удобijr}^{прод\ пот} = H_{ijr}^{удобр} \cdot m_{ijr}^{биоотх}, \quad (20)$$

где $H_{ijr}^{удобр}$ – количество удобрений, производимых из одной тонны биомассы.

Все виды потенциалов, оценённые в натуральных единицах, представимы и в стоимостном измерении, т. е. они могут быть преобразованы в соответствующие экономические потенциалы энергетического использования ПЖ сельскохозяйственных животных.

Экономический потенциал ресурсосбережения определяют, умножая количество сэкономленного топлива на его планово-заготовительную цену.

Эколого-экономический потенциал оценивают в виде произведения экологического потенциала (приведённой массы выбросов, сбросов), удельных ущербов и коэффициентов экологической опасности для реципиентов в зоне влияния источника загрязнения. Предотвращение платежей за негативное воздействие

Таблица 2/ Table 2

Оценка потенциалов энергетического использования биомассы на территории ПФО (фрагмент)
Assessment of biomass energy utilization potentials in the territory of the Volga Federal District (fragment)

Название показателя The name of the value	Единица измерения Unit of measurement	Республика Башкортостан Republic of Bashkortostan	Республика Мордовия Republic of Mordovia	Республика Татарстан Republic of Tatarstan	...	Саратовская область Saratov Oblast	Пермский край Perm Krai	Приволжский округ Volga Federal District
1	2	3	4	5	...	15	16	17
Энергетические потенциалы / Energy potentials								
Топливный Fuel	млн т у.т./год mln t.s.f/year	0,726	0,183	0,602	...	0,307	0,168	3,480
Электроэнергетический Electric power	млн кВт·ч/год mln kW·h/year	2107,4	532,0	1746,1	...	891,2	486,5	10098,9
Теплоэнергетический Thermal power engineering	млн Гкал/год mln Gcal/year	4,886	1,233	4,048	...	2,066	1,128	23,41
Потенциалы ресурсосбережения – количество сберегаемого топлива Resource saving potentials – the amount of fuel saved								
Природный газ Natural gas	млн м ³ /год mln m ³ /year	629,1	158,8	521,2	...	266,0	145,2	3014,8
Каменный уголь / Coal	млн т/год mln t/year	0,945	0,239	0,783	...	0,400	0,218	4,531
Экологические потенциалы замещения природного газа – предотвращаемые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу / Environmental potentials of natural gas substitution – preventable emissions of pollutants into the atmosphere								
SO _x (SO ₂)	тыс. т/год thousand t/year	0,006	0,002	0,005	...	0,003	0,001	0,029
NO _x (NO ₂)	тыс. т/год thousand t/year	5,033	1,271	4,170	...	2,129	1,162	24,18
CO	тыс. т/год thousand t/year	0,003	0,001	0,003	...	0,001	0,001	0,017
CO ₂	тыс. т/год thousand t/year	1258,2	317,6	1042,5	...	532,1	290,5	6029,6
Приведённая масса Reduced mass	тыс. т CO-экв./год thousand t CO-eq/year	130,8	33,03	108,4	...	55,34	30,21	627,1
Экологические потенциалы замещения каменного угля – предотвращаемая масса выбросов загрязняющих веществ в атмосферу / Ecological coal substitution potentials – the avoidable mass of pollutants released into the atmosphere								
SO _x (SO ₂)	тыс. т/год thousand t/year	42,54	10,73	35,24	...	17,99	9,822	203,8

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. МОДЕЛИ И ПРОГНОЗЫ

NO _x (NO ₂)	тыс. т/год thousand t/ year	9,454	2,386	7,833	...	3,998	2,183	45,30
CO	тыс. т/год thousand t/ year	0,425	0,407	0,352	...	0,180	0,098	2,036
CO ₂	тыс. т/год thousand t/ year	2836,0	715,9	2349,7	...	1199,3	654,7	13590,1
Зола угля Coal ash	тыс. т/год thousand t/ year	283,6	71,59	234,9	...	119,9	65,47	11359,1
Приведённая масса Reduced mass	тыс. т CO-экв./ год thousand t CO-eq/year	57666,4	14557,1	47778,6	...	24387,5	13314,0	276332,1
Экономический потенциал ресурсосбережения – стоимость замещаемого топлива The economic potential of resource saving – the cost of substituted fuel								
Природный газ Natural gas	млн руб./ год mln rub./ year	1714,4	432,8	1420,4	...	725,0	395,8	8215,3
Каменный уголь Coal	млн руб./ год mln rub./ year	1418,0	357,9	1174,8	...	599,6	327,4	6795,1
Эколого-экономические потенциалы - предотвращаемый эколого-экономический ущерб при замещении ископаемого топлива / Ecological and economic potentials – prevented ecological and economic damage caused by the substitution of fossil fuels								
Природный газ Natural gas	млн руб./ год mln rub./ year	457,7	115,5	379,2	...	193,5	105,6	2193,2
Каменный уголь Coal	млн руб./ год mln rub./ year	47229,5	11922,5	39131,5	...	19973,8	10904,4	226321,1

на окружающую среду при размещении отходов рассчитывают путём умножения приведённой массы размещаемых отходов на ставку экологических платежей, применяемую для отходов IV класса опасности [13].

Результаты и обсуждение

Инструментарий. Расчёты потенциалов ПЖ сельскохозяйственных животных проведены с использованием разработанной на кафедре промышленной экологии Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева информационно-вычислительной системы (ИВС) «Потенциалы ВИЭ». В настоящее время в ней реализованы блоки для оценки всех рассмотренных выше

потенциалов энергии солнца, ветра, ПЖ сельскохозяйственных животных, древесных и сельскохозяйственных отходов, твёрдых коммунальных и других органических отходов.

Потенциалы солнечной и ветровой энергии оцениваются путём обработки почасовой статистической информации, собранной за последние 11 лет метеорологическими спутниками NASA и содержащейся в базе данных NASAPOWER. Расчёты осуществляются в узлах географической сетки с шагом 0,25 градуса по меридиану и 0,5 градуса по параллели на всей территории РФ и других стран СНГ.

Потенциалы энергетического использования различных видов органических отходов

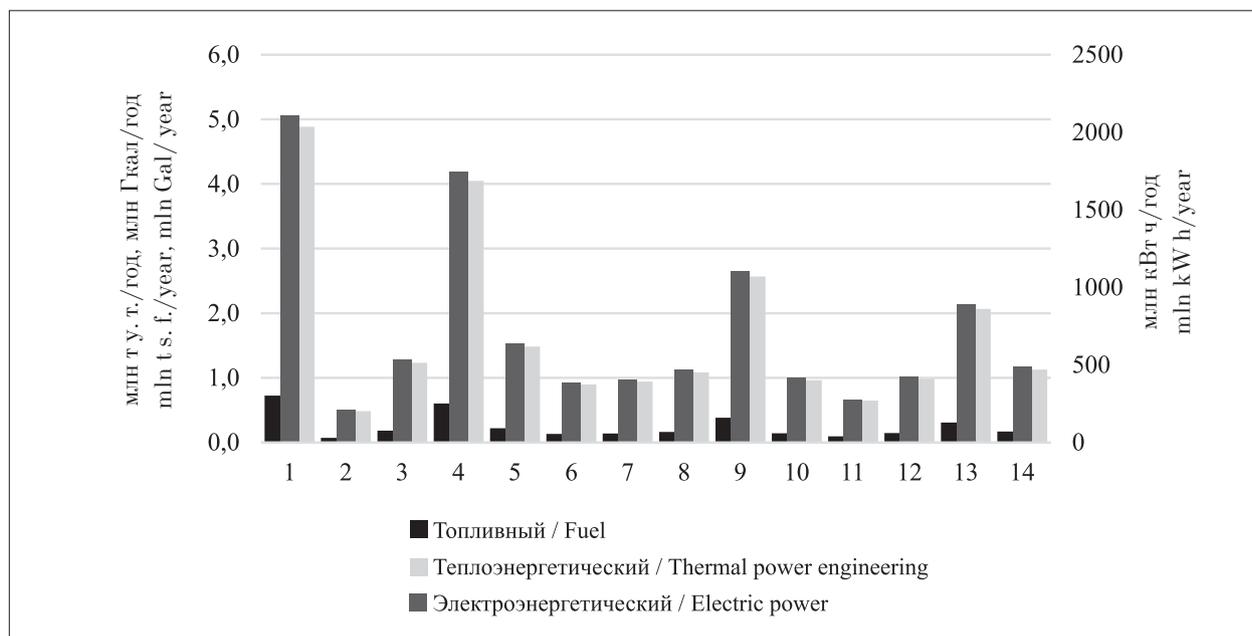


Рис. 2. Диаграмма топливных, теплоэнергетических и электроэнергетических потенциалов продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных на территории субъектов Приволжского федерального округа РФ: 1 – Республика Башкортостан, 2 – Республика Марий-Эл, 3 – Республика Мордовия, 4 – Республика Татарстан, 5 – Республика Удмуртская, 6 – Республика Чувашская, 7 – Кировская область, 8 – Нижегородская область, 9 – Оренбургская область, 10 – Пензенская область, 11 – Ульяновская область, 12 – Самарская область, 13 – Саратовская область, 14 – Пермский край
Fig. 2. Diagram of fuel, thermal energy and electric power potentials of farm animal waste products on the territory of the Volga Federal District of the Russian Federation: 1 – Republic of Bashkortostan, 2 – Republic of Mari El, 3 – Republic of Mordovia, 4 – Republic of Tatarstan, 5 – Republic of Udmurtia, 6 – Republic of Chuvashia, 7 – Kirov region, 8 – Nizhny Novgorod region, 9 – Orenburg region, 10 – Penza region, 11 – Ulyanovsk region, 12 – Samara region, 13 – Saratov region, 14 – Perm region

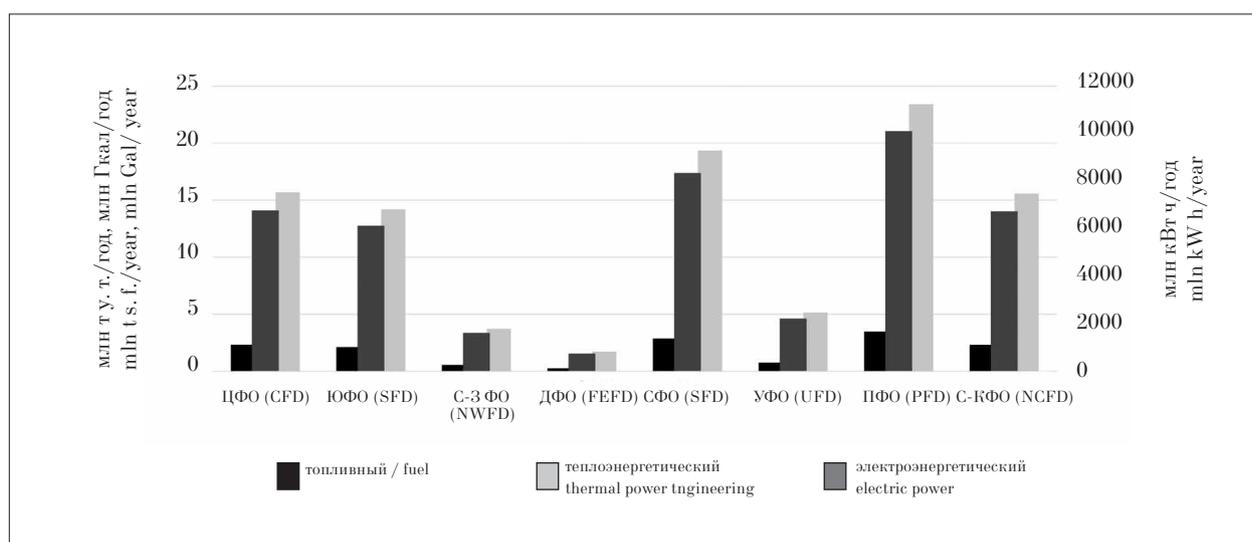


Рис. 3. Значения топливных, теплоэнергетических и электроэнергетических потенциалов продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных на территории федеральных округов Российской Федерации: ЦФО – Центральный, ЮФО – Южный, С-ЗФО – Северо-западный, ДФО – Дальневосточный, СФО – Сибирский, УФО – Уральский, ПФО – Приволжский, С-КФО – Северо-Кавказский
Fig. 3. Values of fuel, thermal energy and electric power potentials of farm animal waste products in the territory of the Federal Districts of the Russian Federation: CFD – Central, SFD – Southern, NWFD – Northwestern, FEFD – Far Eastern, SFD – Siberian, UFD – Ural, PFD – Volga, NCFD – North Caucasian

рассчитываются в рамках городов, районов, субъектов Федерации, федеральных округов, страны в целом.

Математическое и информационное обеспечение ИВС реализуется в программной среде Excel, с помощью языков программирования SQL и Python.

Пример использования методики оценки потенциалов биомассы. Рассмотренная выше методика оценки потенциалов энергетического использования биомассы животноводства применена в разработанной ИВС. Данная система, с дифференциацией по административно-территориальным единицам, позволяет хранить исходную информацию, проводить оценку потенциалов, хранить результаты этой оценки. Предусмотрена возможность изменения любого массива исходных данных в связи с появлением более свежей статистической информации, а также автоматического пересчёта потенциалов.

В таблице 2 представлен пример оценки потенциалов при замещении в энергетическом процессе природного газа и каменного угля биогазом, полученным из ПЖ сельскохозяйственных животных на территории Приволжского федерального округа (ПФО).

Для наглядности на рисунке 2 приводятся результаты расчёта энергетических потенциалов для всех субъектов ПФО.

Потенциалы рассчитаны для субъектов Федерации и федеральных округов России. На рисунке 3 можно ознакомиться с результатами оценки тепловых, теплоэнергетических и топливных потенциалов во всех федеральных округах РФ.

Результаты оценки потенциалов биомассы ПЖ сельскохозяйственных животных и различных видов органических отходов могут служить информационной основой для эколого-экономического обоснования программ развития этого сектора распределённой возобновляемой энергетики [14]. Выбор эффективных направлений инвестирования средств в системы энергоснабжения на основе таких видов повлечёт за собой:

- уменьшение локального загрязнения окружающей среды;
- снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха ПФО по стране в целом;
- сокращение расхода пресной воды;
- отказ от использования ископаемых углеводородов – ценнейшего сырья для нефте- и газохимической промышленности;
- уменьшение объёмов и соответственно затрат на транспортировку дорогостоящего

топлива в удалённые и труднодоступные районы;

- резкое сокращение стоимости инженерных коммуникаций за счёт радикального уменьшения протяжённости линий электропередач и теплотрасс с соответствующим снижением потерь при передаче энергии, эксплуатационных и ремонтных издержек;
- увеличение энергообеспеченности и надёжности энергоснабжения населённых пунктов;
- понижение тарифов на энергию для конечных потребителей, улучшение условий жизни населения.

Заключение

Рассмотренная система потенциалов отличается от существовавших ранее [15] включением в неё ресурсосберегающих, экологических, эколого-экономических потенциалов, позволяющих проводить эколого-экономическое обоснование инвестирования средств в строительство биогазовых энергетических комплексов по переработке продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных как одного из возможных направлений их утилизации. Результаты оценки могут быть использованы для решения задачи оптимизации проектных решений в этой области на стадии обоснования инвестиций. Экономико-математические модели, необходимые для поиска таких решений, в настоящее время разрабатываются.

References

1. Agriculture in Russia. 2023: Data book / Eds. I.V. Vasiliev, N.A. Alimova, S.V. Kiselev, M.P. Klevakina, E.E. Obychayko, A.V. Petrikov, A.V. Ukolova, A.N. Usachev, O.V. Kharina. Moskva: Rosstat, 2023. 103 p. (in Russian).
2. Temporary recommendations on the calculation of emissions of pollutants into the atmospheric air from livestock and poultry facilities. Sankt-Peterburg: JSC “Scientific Research Institute Atmosphere”, 2015. 29 p. (in Russian).
3. Rosprirodnadzor Order No. 242 dated 22.05.2017 (as amended on 18.01.2024) “On approval of the Federal Classification Catalog of Waste” (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 08.06.2017 No. 47008) [Internet resource] https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_218071/ (Accessed: 20.02.2024).
4. Sinelnikov M. By-products are not waste // Zhivotnovodstvo Rossii. 2023. No. 2 [Internet resource] <https://zsr.ru/zsr-2023-02-003?ysclid=m3zrwd1hdr817596153> (Accessed: 29.02.2024) (in Russian).

5. Syrchina N.V., Pilip L.V., Ashimkhina T.Ya. Chemical land degradation under the influence of animal husbandry waste // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 219–225 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225
6. The main indicators of environmental protection. *Statistical Bulletin*. Moskva: Federal State Statistics Service (ROSSTAT), 2023. 105 p. (in Russian).
7. Maksishko L.M. Eco-friendly technology for the processing of livestock manure waste with greenhouse gas absorption // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 1. P. 205–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-1-205-209
8. Sazanov A.V., Terentyev Yu.N., Syrchina N.V., Ashimkhina T.Ya., Kozvonin V.A. Production of bioorganomineral fertilizers as the direction of realization of waste-free technologies in pig-breeding // *Theoretical and Applied Ecology*. 2017. No. 3. P. 85–90 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-085-090
9. Ermolenko B.V., Ermolenko G.V., Proskuryakova L.N. Renewable energy technological potential assessment for evidence-based policy-making // *Emerging technologies for economic development. Science, technology and innovation studies* / Eds. D. Meissner, L. Gokhberg, O. Saritas. Springer, Cham, 2019. P. 107–129. doi: 10.1007/978-3-030-04370-4_5
10. Resolution of the State Statistics Committee No. 46 dated 23.06.1999 “On approval of methodological provisions for calculating the fuel and Energy Balance of the Russian Federation in accordance with international practice” [Internet resource] <https://base.garant.ru/180728/> (Accessed: 17.01.2024) (in Russian).
11. Methodology for determining gross emissions of pollutants into the atmosphere from thermal power plants and boiler houses. Moskva: STO JSC Mosenergo, 2013. 35 p. (in Russian).
12. Methodology for determining emissions of pollutants into the atmosphere when burning fuel in boilers with a capacity of less than 30 tons of steam per hour or less than 20 Gcal per hour. Moskva: JSC “VTI”, 1998. 65 p. (in Russian).
13. Ermolenko B.V., Filimonova N.D. Ecological-economic preconditions for organization of energy supply when pumping oil and oil products using renewable energy sources // *Automation, telemechanization and communication in oil industry*. 2019. No. 5. P. 44–52 (in Russian). doi: 10.33285/0132-2222-2019-5(550)-44-52
14. Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandarova E.B. Renewable energy in decentralized power supply. Moskva: Ergoatomizdat, 2008. 231 p. (in Russian).
15. Handbook on renewable energy resources in Russia and local fuels (indicators by territory) / Ed. P.P. Bezrukikh. Moskva: IAC Energia, 2007. 272 p. (in Russian).