ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.172:631.2
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-38-47

Компартментальная модель для оценки потоков субстанций в сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системе

С.А. Ракутько[1]✉, ***Е.Н. Ракутько***[2]

[1, 2] Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ; г. Санкт-Петербург, Россия

[1] sergej1964@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-2454-4534

[2] elena.rakutko@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3536-9639

Аннотация. Моделирование систем управления позволяет оптимизировать технологии и повысить энергоэффективность и экологичность сельскохозяйственного производства. С целью разработки теоретических основ оценки энергоэффективности и экологичности создана компартментальная модель искусственной биоэнергетической системы, в которой животноводческая ферма и тепличный комплекс рассматриваются как единая интегрированная агроэкосистема. Компартментальная модель, учитывающая поток субстанций (вещества и энергии) между компонентами системы, позволяет оценить энергоэкологичность системы. Искусственная биоэнергетическая система учитывает процессы потребления, внутрисистемного обмена, потерь и вывода полезной продукции. Представленная модель включает в себя компартменты животноводства и растениеводства, характеризующие соответствующие энерготехнологические процессы, блоки преобразования вещества и определяющие их функционирование блоки преобразования энергии. Представлен комплекс показателей, характеризующих энергетическую и материальную эффективность, потери, диссипацию, коэффициенты обмена и синтеза, а также интегральный показатель – коэффициент энергоэкологичности. Модель послужит научной основой для оптимизации технологий и перехода к принципам циркулярной экономики в АПК. Результаты исследований могут быть использованы для разработки энергоэффективных и экологически безопасных технологий в сельском хозяйстве, снижающих антропогенную нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: компартментальная модель; энергоэффективность; экологичность; энергоэкологичность; коэффициент энергоэкологичности; тепличный комплекс; животноводческая ферма; искусственная биоэнергетическая система; поток субстанций

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0010.

Для цитирования: Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Компартментальная модель для оценки потоков субстанций в сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системе // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 38-47. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-38-47

ORIGINAL ARTICLE

Compartmental model for assessing the flows of substances in an engineered agricultural bio-energy system

S.A. Rakutko[1]✉, ***E.N. Rakutko***[2]

[1, 2] Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – branch of FSAC VIM; Saint Petersburg, Russia

[1] sergej1964@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-2454-4534

[2] elena.rakutko@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3536-9639

Abstract. The modeling of control systems enables the optimization of technological processes, thereby enhancing both the energy efficiency and environmental sustainability of agricultural production. To establish a theoretical foundation for evaluating these performance indicators, the authors have developed a compartmental model of an engineered bioenergy system (EBES), wherein a livestock farm and a greenhouse complex are treated as a single integrated agroecosystem. Taking into account the dynamic mass (matter) and energy flows between components, this compartmental model enables a comprehensive assessment of the system's energy-environmental

© Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., 2026

performance. The model explicitly represents resource consumption, intra-system exchange, losses, and the output of useful products. The model framework incorporates distinct compartments for livestock and crop production to characterize their respective energy-technological processes, alongside material and energy conversion units that govern the system's operation. A comprehensive set of indicators is introduced to evaluate material and energy efficiency, dissipation, losses, exchange and synthesis coefficients, as well as a composite indicator – the energy-environmental coefficient. This model provides a rigorous scientific foundation for technological optimization and the transition toward circular economy principles within the agro-industrial sector. Furthermore, the findings can guide the development of energy-efficient and environmentally safe agricultural technologies, ultimately minimizing the anthropogenic environmental impact.

Keywords: compartmental model; energy efficiency; environmental sustainability; energy-environmental performance; energy-environmental coefficient; greenhouse complex; livestock farm; engineered bioenergy system; flow of substances

Funding: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the State Assignment of the Federal Scientific Center for VIM FGUN-2025-0010.

For citation: Rakutko S.A., Rakutko E.N. Compartmental model for assessing the flows of substances in an engineered agricultural bio-energy system. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):38-47. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-38-47

Введение

Сельское хозяйство как совокупность искусственных агроэкосистем представляет собой сложную организационно-техническую систему, обеспечивающую интенсивное производство сельскохозяйственной продукции на основе биологических и машинных технологий [1]. Как отмечают С.И. Барцев и А.Г. Дегерменджи [2], так же, как и в естественных экосистемах, в искусственной системе растения (продуценты) поглощают углерод и создают биомассу, а животные (консументы) ее потребляют. Круговорот веществ между растениями и животными объединяет животноводство и растениеводство как взаимосвязанные компоненты агроэкосистемы [3].

Особенности структуры энергообеспечения сельскохозяйственного производства требуют особого подхода к оптимизации системы энергоснабжения [4]. Одним из способов энергоэффективного и экологически безопасного производства сельскохозяйственной продукции является объединение животноводческой фермы с тепличным комплексом в единую искусственную систему, что обеспечивает возможность рационального использования выделяемых животными субстанций выращиваемыми здесь же растениями [5]. Так, по мнению В.В. Гордеева и др. [6], молочная ферма на 100 коров с теплицей обеспечивает минимальную антропогенную нагрузку на окружающую среду и способствует повышению эффективности и конкурентоспособности производства молока.

В прифермской теплице, образующей вместе с фермой искусственную агроэкосистему, одновременно решаются проблемы утилизации стоков и обеспечения растений питательными веществами. При этом энергозатраты на полив и минеральную подкормку растений могут быть компенсированы за счет энергосодержания стоков доильного зала. По оценкам Е.Е. Хазанова [7], энергетический потенциал стоков от одной коровы составляет около 28 ГДж в год, что почти в 13 раз превышает энергозатраты на полив и минеральную подкормку растений, произрастающих на 1 м^2 теплиц. Согласно оценкам Т.Ю. Мироновой и В.В. Гордеева [8] для полной утилизации навозосодержащих стоков доильного зала молочной фермы на 640 коров полезная площадь прифермской теплицы-розария должна составлять 2281 м^2. При этом капитальные вложения составят 1714 млн руб., годовой экономический эффект – 6173 млн руб., срок окупаемости – 3,3 месяца. В результате расчета Е.Е. Хазановым [9] теплового баланса новой молочной фермы, совмещенной с тепличным комплексом, установлено, что за счет рационального использования выделяемого животными тепла, уменьшения площади наружных ограждений и применения новых строительных материалов потери тепла могут быть сокращены в 2,7 раза по сравнению с типовым проектным решением.

Перспективным является использование нетрадиционных источников энергии – в частности, солнечной в комбинированных гелиотеплицах и животноводческих фермах. Так, Б.Э. Хайриддинов и др. [10] отмечают, что в комбинированных гелиотеплицах животноводческих ферм аккумулируемая в почве за день солнечная энергия передается растениям в ночное время, повышая скорость их роста и продолжительность выращивания. Исследования В.Т. Тайсаева и Л.Р. Мазаева [11] показали, что оптимизация элементов конструкции теплицы

с аккумулированием избыточного солнечного тепла в совмещенных с конструкциями теплиц аккумуляторах позволяет снизить энергопотребление и выброс углекислого газа в 2 раза.

Кроме того, перспективным является использование газообразных выбросов животноводческих ферм. В исследовании Е.Е. Хазанова и С.Г. Хазановой [12] расчетно-аналитическим методом показано, что содержащиеся в вентиляционных выбросах коровника углекислый газ и аммиак могут использоваться для подкормки растений в теплицах. При этом эффективность использования растениями удобрений повышается на 16,8%, удельный расход минеральных удобрений снижается на 8,9%, а коэффициент энергетической эффективности внесенных удобрений увеличивается на 25,3%. Энергетический потенциал газообразных выделений одной коровы за стойловый период составляет около 21 ГДж. Согласно оценке В.Н. Миронова и др. [13] при выращивании цветов аккумулирование выбросов в подпочвенном слое теплицы позволит снизить удельные энергетические затраты на 20,5%, повысить энергосодержание готовой продукции на 65,5%; коэффициент энергетической эффективности при этом возрастет на 25%. Дополнительный эффект будет проявлен в виде повышения урожайности, увеличения плодородия субстрата, сокращения расхода минеральных удобрений.

Детальный анализ функциональных связей между элементами сложной системы (тепличный комплекс + животноводческая ферма) [14] и моделирование систем управления сельскохозяйственных экосистем позволят достигнуть высоких производственных показателей. В экологическом моделировании агросистем широко применяют потоковые модели [15]. Энергетическая модель животноводческой экосистемы служит эффективным аналитическим инструментом для проведения экономических расчетов, моделирования последствий внешних воздействий, оценки энергетической эффективности системы через анализ баланса входных и выходных потоков энергии [16]. Анализ энергетических потоков в теплице позволяет оценить возможности энергосбережения на каждом этапе преобразования энергии и вещества в светокультуре [17].

Для повышения энергоэффективности и экологичности производства в условиях соблюдения заданных требований и ограничений по устойчивости его функционирования, качества и надежности управления актуальной является разработка средств моделирования систем управления в сельскохозяйственных экосистемах.

Цель исследований: разработка теоретических основ оценки энергоэффективности и экологичности сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системы (*ИБЭС*) с помощью модели потоков субстанций.

Материалы и методы

Исследование закономерности преобразования потоков антропогенной энергии в агроэкосистеме проведено с применением эколого-энергетического анализа[1]. В балансовых компартментальных моделях рассматриваются потоки вещества и энергии между составляющими модель компартментами. Моделируемая искусственная биоэнергетическая система состоит из блоков – компартментов (*compartment* – отделение, раздел). Компартменты взаимодействуют между собой и с окружающей средой, обмениваясь веществом и энергией[2]. Рассмотрены обменные материальные процессы как между системой и окружающей средой, так и внутри системы (межблоковый обмен). Скорости обмена заданы на основе биологических данных [18].

В качестве инструмента для анализа, оптимизации и разработки энерготехнологических процессов (*ЭТП*) использовали математический аппарат метода конечных отношений профессора В.Н. Карпова[3]. Протекающие в *ЭТП* операции связаны с перемещением различного вида субстаций при возникновении градиента потенциала.

Первичный анализ взаимосвязи параметров модели проведен с помощью ИИ DeepSeek-R1. Построение графических зависимостей выполнено на языке программирования Piton в Google Colab.

Результаты и их обсуждение

Сложная искусственная биоэнергетическая система, представленная в виде совокупности взаимосвязанных подсистем, обеспечивает компонентам подсистем относительную независимость и одновременно улучшает управляемость системой в целом.

Разработанная компартментальная модель *ИБЭС* (рис. 1) включает в себя два блока: $ЭТП^{К}$ и $ЭТП^{Р}$. Функционирование системы описывается величинами потоков субстанций, которыми система обменивается с окружающей средой (*ОС*), а также циркулирующих внутри системы[4]. Материальные

[1] Odum H.T. Environmental accounting, emergy and environmental decision making. New Yourk: John Willey&Sons, Inc, 1996.

[2] Шеин Е.В., Рыжова И.М. Математическое моделирование в почвоведении: Учебник. М., 2016. 377 с.

[3] Карпов В.Н. Энергосбережение. Метод конечных отношений: Монография. Санкт-Петербург, 2005. 138 с.

[4] Иерархическая информационная модель искусственной биоэнергетической системы: Пат. РФ № 2528577 / Ракутько С.А. 2014103138/08; заявл. 29.01.14; Опубл. 18.06.2015.

потоки включают движение семян, рассады, удобрений, пестицидов, воды, субстрата, углекислоты и других газов, урожая, кормов и добавок, поголовья животных для выращивания и откорма, подстилочных материалов, упаковки и тары, навоза, готовой продукции, биологических отходов и стоков. Энергетические потоки образованы различными видами энергии (тепловой, механической, электрической, световой, различными видами топлива).

На рисунке 1 показана вложенность уровней модели с указанием потоков энергии и вещества: первый уровень *ИБЭС* функционирует в пределах *ОС*; второй уровень соответствует *ЭТП*; третий уровень характеризует блоки преобразования энергии (*БПЭ*) и вещества (*БПВ*) в каждом блоке второго уровня. Интенсивность преобразований вещества в *БПВ* определяется процессами преобразования энергии в *БПЭ*.

В компартментальной модели выделены следующие процессы:

Потребление. Входные потоки вещества $M_н$ и энергии $Q_н$ различных видов (образующие входной поток субстанций $S_н$) участвуют в энерготехнологических процессах животноводства $ЭТП^Ж$ ($M_н^Ж$ и $Q_н^Ж$) и растениеводства $ЭТП^Р$ ($M_н^Р$ и $Q_н^Р$).

Внутрисистемный обмен. Часть продукции и энергии, которые следует отнести к потерям в своем *ЭТП*, используется в другом *ЭТП*, то есть потоки $M_о^{Ж-Р}$ и $Q_о^{Ж-Р}$ из $ЭТП^Ж$ поступают на входы $ЭТП^Р$, а потоки $M_о^{Р-Ж}$ и $Q_о^{Р-Ж}$ из $ЭТП^Р$ поступают на входы $ЭТП^Ж$.

Потери. Не используемые далее в своих *ЭТП* потоки вещества ($\Delta M^Ж$ и $\Delta M^Р$) и энергии ($\Delta Q^Ж$ и $\Delta Q^Р$) составляют потоки потерь вещества ΔM и энергии ΔQ, образующие общие потери субстанций ΔS.

Вывод. Потоки выводимой хозяйственно-полезной продукции $M_к^Ж$ и $M_к^Р$ составляют поток $M_к$, образующий поток полезной субстанции $S_к$.

Сформированные после преобразований энергетические потоки ($Q_к^Ж$ в $БПЭ^Ж$ и $Q_к^Р$ в $БПЭ^Р$) определяют функционирование, соответственно, блоков $БПВ^Ж$ и $БПВ^Р$.

Режимы проведения энерготехнологических процессов определяются управляющими параметрами X_i на уровнях *БПЭ* и *БПВ*.

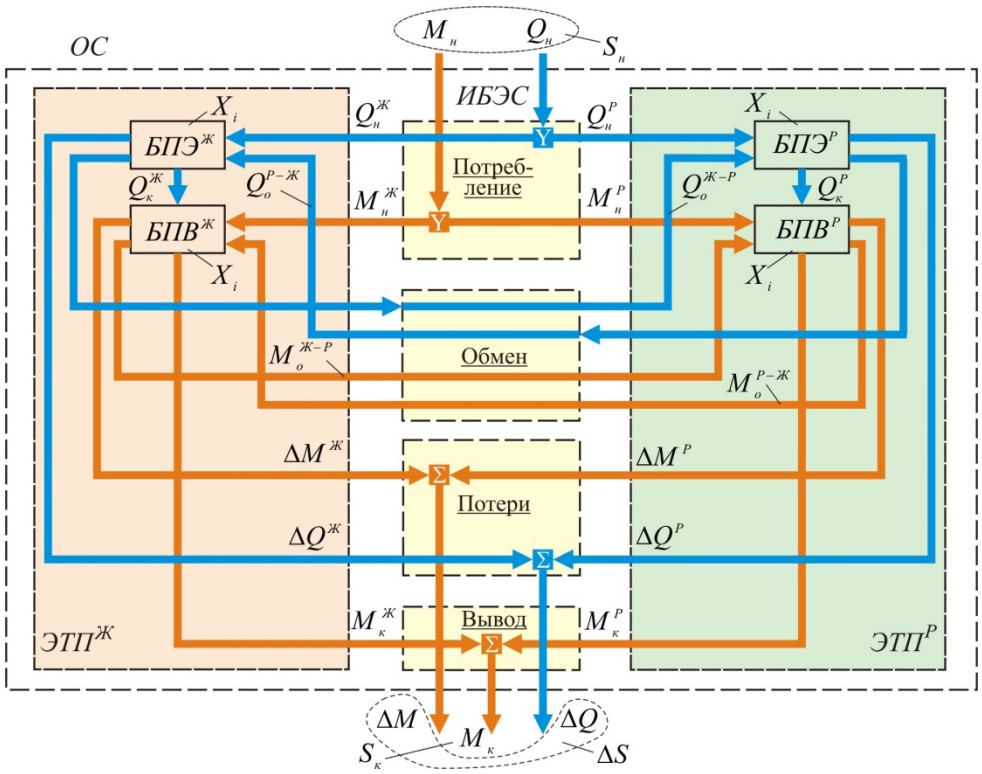


Рис. 1. Компартментальная модель потоков субстанций в искусственной биоэнергетической системе (ИБЭС):
ОС – окружающая среда; $ЭТП^Ж$ и $ЭТП^Р$ – энерготехнологические процессы в животноводстве и растениеводстве;
БПЭ – блок преобразования энергии; *БПВ* – блок преобразования вещества;
M, *Q* и *S* – потоки вещества, энергии и субстанций; ΔM, ΔQ и ΔS – потери вещества, энергии и субстанций

Fig. 1. Compartmental model of mass and energy flows in the EBES:
OC – environment; $ЭТП^Ж$ and $ЭТП^Р$ – energy-technological processes in livestock and crop production;
БПЭ – energy conversion unit; *БПВ* – substance conversion unit; *M*, *Q* and *S* – flows of matter, energy, and substances;
ΔM, ΔQ and ΔS – losses of matter, energy, and substances

Модель опирается на балансовые соотношения, которые можно записать одновременно для потоков вещества *M* и энергии *Q*, используя общее обозначение для субстанций *S*:

$$\begin{cases} S_{\text{н}} = S_{\text{н}}^{\text{Ж}} + S_{\text{н}}^{\text{Р}} \\ S_{\text{н}}^{\text{Ж}} + S_{\text{о}}^{\text{Р–Ж}} = S_{\text{к}}^{\text{Ж}} + \Delta S^{\text{Ж}} + S_{\text{О}}^{\text{Ж–Р}} \\ S_{\text{н}}^{\text{Р}} + S_{\text{о}}^{\text{Ж–Р}} = S_{\text{к}}^{\text{Р}} + \Delta S^{\text{Р}} + S_{\text{О}}^{\text{Р–Ж}} \\ \Delta S = \Delta S^{\text{Ж}} + \Delta S^{\text{Р}}. \end{cases} \quad (1)$$

Отметим основные показатели модели, характеризующие потоки субстанций в *ЭТП*^{Ж}, *ЭТП*^{Р} и *ИБЭС*:

1. Энергетическая эффективность (КПД по энергии) (η_Q, отн. ед.) отражает долю полезно используемой энергии от потребляемой энергии:

$$\eta_Q^{\text{Ж}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \eta_Q^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \eta_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}. \quad (2)$$

2. Материальная эффективность (КПД по веществу) (η_M, отн. ед.) отражает долю полезно используемого вещества от количества используемого вещества:

$$\eta_M^{\text{Ж}} = \frac{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \eta_M^{\text{Р}} = \frac{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \eta_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{M_{\text{к}}}{M_{\text{н}}} = \frac{M_{\text{к}}^{\text{Ж}} + M_{\text{к}}^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}} + M_{\text{н}}^{\text{Р}}}. \quad (3)$$

3. Коэффициент потерь энергии (δ_Q, отн. ед.) показывает долю потерь энергии от потребляемой энергии:

$$\delta_Q^{\text{Ж}} = \frac{\Delta Q^{\text{Ж}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \delta_Q^{\text{Р}} = \frac{\Delta Q^{\text{Р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \delta_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{н}}}; \quad (4)$$

$$\delta_Q^{\text{Ж}} = 1 - \eta_Q^{\text{Ж}}; \delta_Q^{\text{Р}} = 1 - \eta_Q^{\text{Р}}; \delta_Q^{\text{ИБЭС}} = 1 - \eta_Q^{\text{ИБЭС}}. \quad (5)$$

4. Коэффициент потерь вещества (δ_M, отн. ед.) показывает долю потерь вещества от количества используемого вещества:

$$\delta_M^{\text{Ж}} = \frac{\Delta M^{\text{Ж}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \delta_M^{\text{Р}} = \frac{\Delta M^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \delta_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta M}{M_{\text{н}}}. \quad (6)$$

5. Коэффициент диссипации энергии (ϑ_Q, отн. ед.) учитывает долю потерь энергии от полезно используемой энергии:

$$\vartheta_Q^{\text{Ж}} = \frac{\Delta Q^{\text{Ж}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \vartheta_Q^{\text{Р}} = \frac{\Delta Q^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \vartheta_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{к}}}. \quad (7)$$

6. Коэффициент диссипации вещества (ϑ_M, отн. ед.) учитывает долю потерь вещества от количества полезной продукции:

$$\vartheta_M^{\text{Ж}} = \frac{\Delta M^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \vartheta_M^{\text{Р}} = \frac{\Delta M^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \vartheta_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta M}{M_{\text{к}}}. \quad (8)$$

7. Удельные потери энергии на единицу продукции (ρ_Q, Дж·кг$^{-1}$) отражают потери энергии, связанные с синтезом единицы полезной продукции:

$$\rho_Q^{\text{Ж}} = \frac{\Delta Q^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \rho_Q^{\text{Р}} = \frac{\Delta Q^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \rho_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta Q}{M_{\text{к}}}. \quad (9)$$

8. Удельные потери вещества на единицу полезной энергии (ρ_M, кг·Дж$^{-1}$) отражают потери вещества, связанные единицей полезно используемой энергии:

$$\rho_M^{\text{Ж}} = \frac{\Delta M^{\text{Ж}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \rho_M^{\text{Р}} = \frac{\Delta M^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \rho_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{\Delta M}{Q_{\text{к}}}. \quad (10)$$

9. Энергоемкость процессов ($\varepsilon_{\text{П}}$, отн. ед.) показывает превышение потребляемого количества энергии по сравнению с полезно используемой энергией:

$$\varepsilon_{\text{П}}^{\text{Ж}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \varepsilon_{\text{П}}^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \varepsilon_{\text{П}}^{\text{ИБЭС}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{к}}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}. \quad (11)$$

10. Массоемкость процессов ($\mu_{\text{П}}$, отн. ед.) показывает превышение количества используемого вещества по сравнению с полезной продукцией:

$$\mu_{\text{П}}^{\text{Ж}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \mu_{\text{П}}^{\text{Р}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \mu_{\text{П}}^{\text{ИБЭС}} = \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{к}}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}} \frac{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \quad (12)$$

$$\mu_{\text{П}}^{\text{Ж}} = 1/\eta_{\text{М}}^{\text{Ж}}; \mu_{\text{П}}^{\text{Р}} = 1/\eta_{\text{М}}^{\text{Р}}; \mu_{\text{П}}^{\text{ИБЭС}} = 1/\eta_M^{\text{ИБЭС}}. \quad (13)$$

11. Энергоемкость продукции (ε_M, Дж·кг$^{-1}$) показывает количество полезной используемой энергии, необходимой для получения единицы полезной продукции:

$$\varepsilon_M^{\text{Ж}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \varepsilon_M^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \varepsilon_M^{\text{ИБЭС}} = \frac{Q_{\text{к}}}{M_{\text{к}}} = \frac{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}} + M_{\text{к}}^{\text{Р}}}. \quad (14)$$

12. Удельный коэффициент синтеза вещества (ω_Q, кг·Дж$^{-1}$) отражает количество используемого вещества, преобразуемого в полезную продукцию под действием единицы полезно используемой энергии:

$$\omega_Q^{\text{Ж}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \omega_Q^{\text{Р}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \omega_Q^{\text{ИБЭС}} = \frac{M_{\text{н}}}{Q_{\text{к}}} = \frac{M_{\text{н}}^{\text{Ж}} + M_{\text{н}}^{\text{Р}}}{Q_{\text{к}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{к}}^{\text{Р}}}. \quad (15)$$

13. Энергоемкость используемого вещества (энергоемкость сырья) (ε_C, Дж·кг$^{-1}$) показывает количество потребляемой энергии, затрачиваемой при синтезе единицы используемого вещества:

$$\varepsilon_{\text{С}}^{\text{Ж}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \varepsilon_{\text{С}}^{\text{Р}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \varepsilon_{\text{С}}^{\text{ИБЭС}} = \frac{Q_{\text{н}}}{M_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}} + Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}} + M_{\text{н}}^{\text{Р}}}. \quad (16)$$

14. Удельная энергоемкость ($\varepsilon_{\text{уд}}$, отн. ед.·кг$^{-1}$) показывает численное значение энергоемкости процессов на единицу полезной продукции:

$$\varepsilon_{\text{уд}}^{\text{Ж}} = \frac{\varepsilon_{\text{П}}^{\text{Ж}}}{M_{\text{к}}^{\text{Ж}}}; \varepsilon_{\text{уд}}^{\text{Р}} = \frac{\varepsilon_{\text{П}}^{\text{Р}}}{M_{\text{к}}^{\text{Р}}}; \varepsilon_{\text{уд}}^{\text{ИБЭС}} = \frac{\varepsilon_{\text{П}}^{\text{ИБЭС}}}{M_{\text{к}}}. \quad (17)$$

15. Коэффициенты обмена по энергии (σ_Q, отн. ед.) и веществу (σ_M, отн. ед.) отражают долю возвращаемой субстанции в соседний *ЭТП* по сравнению с потребляемой субстанцией в данном блоке:

$$\sigma_Q^{\text{Р–Ж}} = \frac{Q_{\text{О}}^{\text{Р–Ж}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \sigma_Q^{\text{Ж–Р}} = \frac{Q_{\text{О}}^{\text{Ж–Р}}}{Q_{\text{н}}^{\text{Р}}}; \sigma_M^{\text{Р–Ж}} = \frac{M_{\text{О}}^{\text{Р–Ж}}}{M_{\text{н}}^{\text{Ж}}}; \sigma_M^{\text{Ж–Р}} = \frac{M_{\text{О}}^{\text{Ж–Р}}}{M_{\text{н}}^{\text{Р}}}. \quad (18)$$

16. Зависимости между количеством полезно потребляемой энергии и полезной продукцией

в соответствующих компартментах определяются экспериментально в виде функций:

$$M_{к}^{Ж} = f_{Ж}(Q_{к}^{Ж}); M_{к}^{Р} = f_{Р}(Q_{к}^{Р}). \quad (19)$$

17. Коэффициент энергоэкологичности ($K_{ЭЭ}$, отн. ед.) отражает долю полезной продукции от количества использованного на ее получение вещества:

$$K_{ЭЭ}^{Ж} = \frac{M_{к}^{Ж}}{M_{н}^{Ж}} = \frac{M_{н}^{Ж} - \Delta M^{Ж}}{M_{н}^{Ж}} = 1 - \delta_{M}^{Ж};$$

$$K_{ЭЭ}^{Р} = 1 - \delta_{M}^{Р}; K_{ЭЭ}^{ИБЭС} = 1 - \delta_{M}^{ИБЭС}. \quad (20)$$

Система основных показателей модели, характеризующих потоки субстанций, представлена на рисунке 2. Начало стрелки соответствует потоку в числителе соответствующей формулы, конец стрелки отвечает потоку в знаменателе. Символы показателей указаны напротив стрелок, в круглых скобках указаны формулы для их вычисления. «Несимметричность» системы показателей относительно *БПЭ* и *БПВ* вызвана неполной симметрией процессов в *ИБЭС*: выход $Q_к$ *БПЭ* является входом *БПВ*, однако его выход $M_к$ уже является выходом всего *ЭТП*.

Для предлагаемой компартментальной модели выбраны три показателя энергоемкости: $\varepsilon_С$, $\varepsilon_П$ и ε_M (рис. 2), обобщенно характеризующие энергоэкологичность *ИБЭС*.

Связь энергоемкости и энергоэкологичности в *ЭТП*^{Ж}, *ЭТП*^{Р} и *ИБЭС*, отн. ед., можно записать в виде выражений:

$$K_{ЭЭ}^{Ж} = \frac{\varepsilon_{С}^{Ж}}{\varepsilon_{П}^{Ж}\varepsilon_{M}^{Ж}}; K_{ЭЭ}^{Р} = \frac{\varepsilon_{С}^{Р}}{\varepsilon_{П}^{Р}\varepsilon_{M}^{Р}}; K_{ЭЭ}^{ИБЭС} = \frac{\varepsilon_{С}^{ИБЭС}}{\varepsilon_{П}^{ИБЭС}\varepsilon_{M}^{ИБЭС}}. \quad (21)$$

Связь показателей эффективности преобразования энергии и вещества на макроуровне модели с физическими величинами, характеризующими процессы на ее микроуровне в *ЭТП*^{К}, *ЭТП*^{Р} и *ИБЭС* с учетом выражения для полезно используемой энергии, кВт·ч (с использованием обозначений для поперечной ζ и продольной ξ переменных $Q_к = \zeta_к \xi_к$ [19]), можно записать как

$$\frac{\varepsilon_{M}^{Ж}\varepsilon_{П}^{Ж}}{\varepsilon_{уд}^{Ж}} = \zeta_{к}^{Ж}\xi_{к}^{Ж}; \frac{\varepsilon_{M}^{Р}\varepsilon_{П}^{Р}}{\varepsilon_{уд}^{Р}} = \zeta_{к}^{Р}\xi_{к}^{Р}; \frac{\varepsilon_{M}^{ИБЭС}\varepsilon_{П}^{ИБЭС}}{\varepsilon_{уд}^{ИБЭС}} = \zeta_{к}^{ИБЭС}\xi_{к}^{ИБЭС}. \quad (22)$$

Оптимизация функционирования *ИБЭС* для каждого компонента ее модели X_j по критерию минимальной энергоемкости процессов требует соблюдения условий:

$$\frac{\partial\varepsilon_{П}^{Ж}}{\partial X_i} = 0; \frac{\partial\varepsilon_{П}^{Р}}{\partial X_i} = 0; \frac{\partial\varepsilon_{П}^{ИБЭС}}{\partial X_i} = 0. \quad (23)$$

Максимальная энергоэкологичность (оптимум функционирования) *ЭТП*^{К}, *ЭТП*^{Р} и *ИБЭС* в целом ($K_Э = 1$) в соответствии с выражениями (21) наблюдается при соблюдении соотношений:

$$\varepsilon_{П}^{Ж} = \frac{\varepsilon_{С}^{Ж}}{\varepsilon_{M}^{Ж}}; \varepsilon_{П}^{Р} = \frac{\varepsilon_{С}^{Р}}{\varepsilon_{M}^{Р}}; \varepsilon_{П}^{ИБЭС} = \frac{\varepsilon_{С}^{ИБЭС}}{\varepsilon_{M}^{ИБЭС}}. \quad (24)$$

Для этого случая без указания принадлежности к определенным компартаментам можно записать уравнение баланса субстанций в процессе их преобразований в *ИБЭС*:

$$\varepsilon_{С} = \varepsilon_{П} \cdot \varepsilon_{M} \text{ или } \frac{Q_{н}}{M_{н}} = \left(\frac{Q_{н}}{Q_{к}}\right) \cdot \left(\frac{Q_{к}}{M_{к}}\right). \quad (25)$$

Научно-технологическое развитие агропромышленного комплекса требует решения вопросов энергосбережения и экологии. Идея совместного учета и интеллектуального управления потоками субстанций оказалась весьма плодотворной для оценки энергоэффективности и экологичности *ИБЭС* [20].

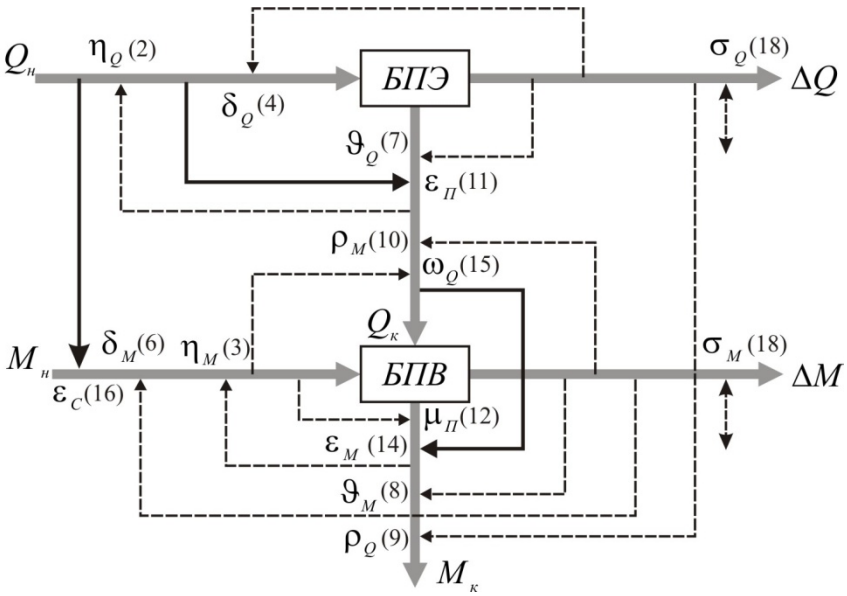


Рис. 2. Соответствие между потоками субстанций и взаимосвязанными с ними показателями

Fig. 2. Basic relationship between the flows of substances and the indicators characterizing their relationship

Ряд предложенных нами показателей совпадает с известными применяемыми показателями. Например, коэффициент конверсии корма *FCR* (*Feed Conversion Ratio*), представляющий собой отношение массы потребленного корма к массе прироста продукции (мяса, молока, яиц), в рамках предложенной модели соответствует показателю $\mu_{П}^{Ж}$. Его типовые значения, согласно оценке J.P. Fry и др. [21], для бройлеров составляют 1,4…1,8 отн. ед., для свиней на откорме – 2,5…3,0 отн. ед., для КРС – 5,6…6,0 отн. ед. и более. Этот же показатель применяется для оценки эффективности использования питательных веществ *NUE*, *Nutrient Use Efficiency* (например, по азоту *NUE-N*, фосфору *NUE-P*, калию *NUE-K* и других элементов), а также для оценки эффективности потребления воды *WUE* (*Water Use Efficiency*). Уровень выделения отходов (количество экскрементов (навоза, мочи) на единицу продукции) может быть охарактеризован показателем $\vartheta_{M}^{Ж}$. Показателем эффективности использования энергии *EUE* (*Energy Use Efficiency*) является отношение энергии, содержащейся в растениеводческой продукции, к затраченной энергии. Ему соответствует показатель $\eta_{Q}^{Р}$.

В данной работе представлен единый подход к характеристике потоков субстанций системой показателей. В результате моделирования установлено, что энергоемкость сырья $\varepsilon_{с}$ отражает количество потребляемой энергии $Q_{н}$, затрачиваемой при обработке единицы используемого вещества $M_{н}$. Меньшие значения $\varepsilon_{с}$ свидетельствуют о меньших энергозатратах. Энергоемкость процессов $\varepsilon_{п}$ отражает то, насколько количество потребляемой энергии $Q_{н}$ превосходит количество полезно используемой энергии $Q_{к}$. Меньшие значения $\varepsilon_{п}$ свидетельствуют о большей энергоэффективности процессов в *ИБЭС*. Энергоемкость продукции $\varepsilon_{м}$ отражает количество полезно используемой энергии $Q_{к}$, приходящейся на синтез единицы полезной продукции $M_{к}$. Меньшее значение $\varepsilon_{м}$ свидетельствует о меньших энергозатратах.

Согласно уравнению (25), связывающему показатели $\varepsilon_{с}$, $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$ при $K_{ЭЭ}$ =1, построена плоскость (и ее сечения) (рис. 3).

Поверхность, изображенная на рисунке 3а, представляет собой часть гиперболического параболоида, построенного в квадрантах с положительными значениями показателей. Согласно данным рисунка чем выше $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$, тем быстрее растет $\varepsilon_{с}$. Если $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$ падают, то снижается энергоемкость сырья $\varepsilon_{с}$.

Рассмотрим частные случаи сечения поверхности характерными плоскостями:

a) при $\varepsilon_{п} = const$ (прямая линия) и, например, $\varepsilon_{п}$ = 1,5 (потери энергии 50%) (рис. 3б). С ростом $\varepsilon_{м}$ энергоемкость сырья $\varepsilon_{с}$ увеличивается;

b) при $\varepsilon_{м} = const$ (прямая линия) и, например, $\varepsilon_{м}$ = 2 (каждая единица массы полезного продукта содержит 2 единицы полезно используемой энергии) (рис. 3в). С ростом $\varepsilon_{п}$ увеличивается $\varepsilon_{с}$.

Вывод 1. При фиксированной $\varepsilon_{п}$ (или $\varepsilon_{м}$) величина $\varepsilon_{с}$ увеличивается при увеличении $\varepsilon_{м}$ (или $\varepsilon_{п}$);

c) при симбатном изменении $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$ в сечении образуется парабола, поскольку при $\varepsilon_{п} = \varepsilon_{м}$, $\varepsilon_{С} = \varepsilon_{П}^{2}$ или $\varepsilon_{С} = \varepsilon_{M}^{2}$ (рис. 3г).

Вывод 2. Одновременное снижение $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$ более эффективно обеспечивает снижение $\varepsilon_{с}$;

d) при $\varepsilon_{С} = const$ (*гипербола*) и, например, $\varepsilon_{с}$ = 6, $\varepsilon_{П} \cdot \varepsilon_{M}$ = 6 (рис. 3д). Гиперболическая зависимость означает компромисс между $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$: можно допустить повышение одного из показателей, но тогда придется обеспечить снижение другого.

Вывод 3. Для заданной энергоемкости сырья $\varepsilon_{с}$ существует множество вариантов технологии, при которых возможны разные комбинации $\varepsilon_{п}$ и $\varepsilon_{м}$.

На рисунке 3е все сечения показаны вместе.

В работе дан один из возможных наборов показателей. Анализ и синтез системы показателей являются задачей дальнейших исследований. В качестве первейшей задачи можно указать их «симметризацию» с выявлением физического смысла вновь введенных показателей. Другой перспективой исследований можно считать экспериментальное получение численных значений введенных показателей.

Концепция энергоэкологичности, означающая совместное рассмотрение вопросов энергоэффективности и экологичности путем цифровизации, внедрения новейших информационных автоматизированных систем, оптимизации технологических процессов, контроля их параметров, позволила рассмотреть энергетику *ИБЭС* с учетом ее многоуровневости и закономерностей взаимодействия сельскохозяйственных биологических объектов и искусственной среды обитания[5].

Совершенствование систем и процессов в *ИБЭС* с применением ресурсов энергосбережения и мер по его реализации является важнейшей частью организации производства. В аспекте энергосбережения оптимальное значение энергоемкости достигается путем минимизации энергоемкости конечных значений всех энерготехнологических процессов электроэнергетической системы, что требует разработки и применения унифицированной методики анализа эффективности энерготехнологических процессов.

[5] Ракутько С.А. Прикладная теория энергосбережения: научные основы, применение в агроинженерном образовании: Монография. СПб.: ЛЕМА, 2024. 254 с.

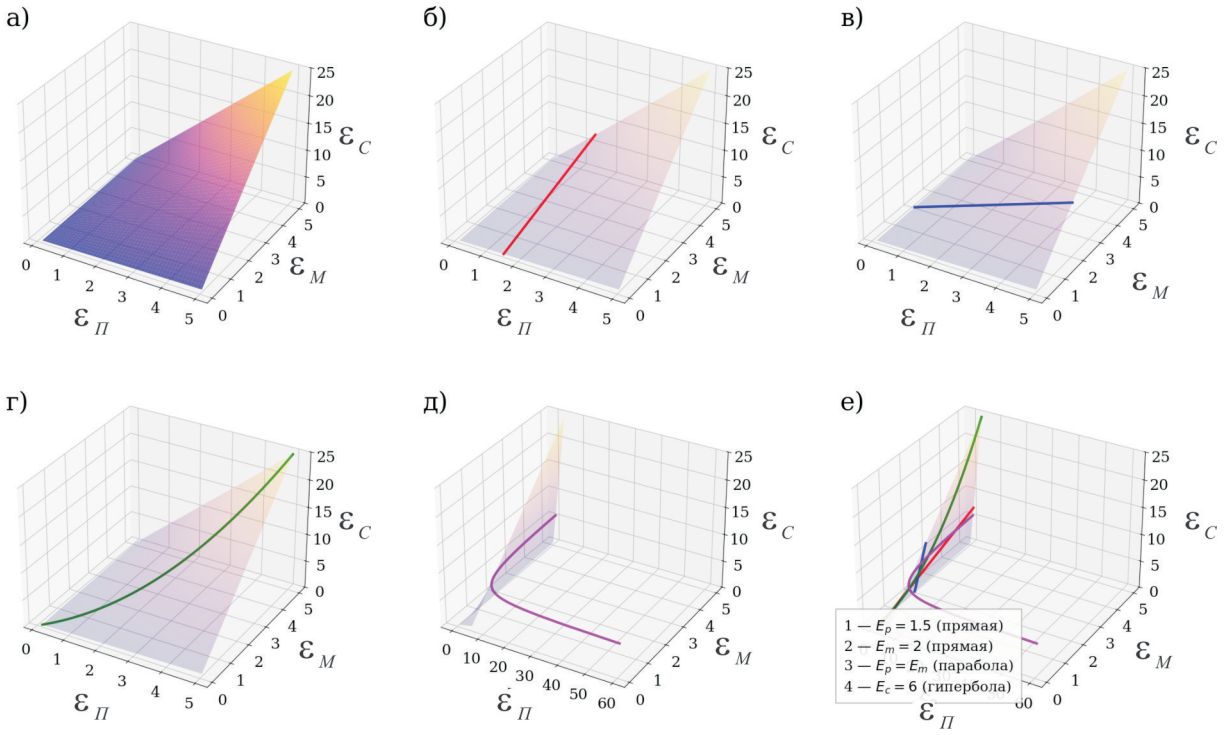


Рис. 3. Плоскость уравнения баланса субстанций и ее сечения

Fig. 3. Plane of the substance balance equation and its cross-sections

Выводы

1. Разработанная компартментальная модель сельскохозяйственной искусственной биоэнергетической системы (*ИБЭС*) позволяет комплексно оценить энергоэффективность и экологичность сельскохозяйственных систем, объединяющих животноводство и растениеводство. Модель основана на взаимосвязи потоков вещества и энергии между компонентами системы и позволяет производить оптимизацию технологических процессов.

2. Модель включает в себя энерготехнологические процессы животноводства и растениеводства, а также описывает потоки субстанций (вещества и энергии) как внутри системы, так и между системой и окружающей средой, что позволяет проводить комплексный эколого-энергетический анализ.

3. Предложенный набор показателей характеризует энергетическую и материальную эффективность, потери, диссипацию, энерго- и массоемкость, коэффициенты обмена и синтеза. Введенный интегральный показатель (коэффициент энергоэкологичности) отражает устойчивость и эффективность функционирования *ИБЭС*.

4. Учитывая энергоемкость сырья, энергоемкость процессов и энергоемкость продукции, можно оценить энергоэкологичность *ИБЭС*. Анализ модели показал, что одновременное снижение энергоемкости процессов и энергоемкости продукции является наиболее эффективным способом уменьшения энергоемкости сырья. Это открывает возможности для разработки инновационных технологий, направленных на минимизацию энергопотребления и повышение устойчивости агроэкосистем.

Список источников

1. Брюханов А.Ю., Попов В.Д., Васильев Э.В., Папушин Э.А. Концепция управления экологической безопасностью агроэкосистем // АгроЭкоИнженерия. 2022. № 4 (113). С. 4-18. EDN: CMQXUA

2. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г. Замкнутые экологические системы: от биосферы к системам жизнеобеспечения и обратно // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93, № 9. С. 876-885. https://doi.org/10.31857/S0869587323090049

3. Hercher-Pasteur J., Loiseau E., Sinfort C. et al. Energetic assessment of the agricultural production system. A review. Agronomy for Sustainable Development. 2020;40:29. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2

References

1. Briukhanov A.Yu., Popov V.D., Vasilev E.V., Papushin E.A. Management concept of ecological safety of agro-ecosystems. *AgroEkoInzheneriya*. 2022;4(113):4-18. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2022-4113-4-18

2. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G. Closed ecological systems: from the biosphere to life support systems and back. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2023;93(9):876-885. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0869587323090049

3. Hercher-Pasteur J., Loiseau E., Sinfort C. et al. Energetic assessment of the agricultural production system. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2020;40:29. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00627-2

4. Тимофеев Е.В., Эрк А.Ф., Судаченко В.Н., Размук В.А. Оптимизация энергоснабжения сельскохозяйственных объектов методом математического моделирования структуры энергетических потоков // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 94. С. 48-55. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10006

5. Попов В.Д., Гордеев В.В., Хазанов Е.Е., Хазанов В.Е. Научные принципы экологически безопасного функционирования системы «Животное-растение» // Экология и сельскохозяйственная техника: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. 2009. С. 47-58. EDN: RZOYKJ

6. Гордеев В.В., Хазанов В.Е., Миронов В.Н. и др. Молочная ферма с теплицей // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2014. № 3 (15). С. 184-187. EDN: SKDOLD

7. Хазанов Е.Е. Энергетический потенциал использования сточных вод доильных залов молочных ферм в культивационных сооружениях // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2001. № 72. С. 120-124. EDN: SZTROL

8. Миронова Т.Ю., Гордеев В.В. Экономические аспекты применения системы внутрипочвенного внесения навозосодержащих стоков доильных залов в теплице // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 3 (100). С. 161-170. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10199

9. Хазанов Е.Е. Оценка энергетической эффективности безотходной молочной фермы-теплицы // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 1998. № 68. С. 70-78. EDN: TBGJHH

10. Хайриддинов Б.Э., Холмирзаев Н.С., Эргашев Ш.Х. и др. Комбинирование гелиотеплицы-животноводческих ферм с подпочвенным аккумулятором тепла // Символ науки: Международный научный журнал. 2017. Т. 2, № 1. С. 16-23. EDN: YGWNSV

11. Тайсаева В.Т., Мазаев Л.Р. Разработка энергоэффективных биотехнических систем на примере молочной фермы и солнечной теплицы с тепловыми аккумуляторами // Ползуновский вестник. 2014. № 4-1. С. 173-177. EDN: SZJREB

12. Хазанов Е.Е., Хазанова С.Г. Энергетический потенциал использования вентиляционных выбросов коровника в прифермской теплице // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2001. № 72. С. 113-120. EDN: SZTROB

13. Миронов В.Н., Гордеев В.В., Миронова Т.Ю. Энергетический потенциал вентиляционных выбросов коровника // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2019. № 1 (98). С. 201-209. https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10138

14. Дорохов А.С., Кирсанов В.В., Баишева Р.А., Кирсанов С.В. Искусственный интеллект в управлении животноводческой фермой // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 1. С. 16-25. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-16-25

15. Patten B.C., Higashi M. Modified cycling index for ecological applications. Ecological Modelling. 1984;25(1-3):69-83. https://doi.org/10.1016/0304-3800(84)90033-4

16. Зайцева Н.К., Гаркуша К.Э. Модель энергетических потоков в животноводческих комплексах // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2002. № 2. С. 89-93. https://energy.bntu.by/jour/article/view/1329

4. Timofeev E.V., Erk A.F., Sudachenko V.N., Razmuk V.A. Optimization of power supply of agricultural facilities by mathematical modeling of power flows structure. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rasteniyevodstva i zhivotnovodstva*. 2018;94:48-55. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10006

5. Popov V.D., Gordeev V.V., Khazanov E.E., Khazanov V.E. Scientific principles of environmentally safe functioning of the "animal-plant" system. In: *Ekologiya i selskokhozyaystvennaya tekhnika*. *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference*. 2009;47-58. (In Russ.)

6. Gordeev V.V., Khazanov V.E., Mironov V.N. et al. Dairy farm with a greenhouse. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatelskogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva.* 2014;3(15):184-187. (In Russ.)

7. Khazanov E.E. Energy potential of utilizing wastewater from milking parlors of dairy farms in greenhouse facilities. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2001;72:120-124. (In Russ.)

8. Mironova T.Yu., Gordeev V.V. Economic aspects of subsurface application of manure-bearing wastewater from milking parlours in a greenhouse. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;3(100):161-170. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10199

9. Khazanov E.E. Evaluation of the energy efficiency of a waste-free dairy farm-greenhouse. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 1998;68:70-78. (In Russ.)

10. Khairiddinov B.E., Kholmirzaev N.S., Ergashev Sh.Kh. et al. Integration of solar greenhouse-and-livestock farm systems with a subsoil heat accumulator. *Symbol of Science*: *International Scientific Journal*. 2017;2(1):16-23. (In Russ.)

11. Taisaeva V.T., Mazaev L.R. Development of energy-efficient biotechnical systems using the example of a dairy farm and a solar greenhouse with heat accumulators. *Polzunovskiy Vestnik*. 2014;4-1:173-177. (In Russ.)

12. Khazanov E.E., Khazanova S.G. Energy potential of using ventilation emissions from a cowshed in an on-farm greenhouse. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2001;72:113-120. (In Russ.)

13. Mironov V.N., Gordeev V.V., Mironova T.Yu. Energy potential of ventilation emissions from a cow barn. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva*. 2019;1(98):201-209. (In Russ.) https://doi.org/10.24411/0131-5226-2019-10138

14. Dorokhov A.S., Kirsanov V.V., Baisheva R.A., Kirsanov S.V. Use of artificial intelligence for managing a livestock farm. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(1):16-25 (In Russ.) https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-1-16-25

15. Patten B.C., Higashi M. Modified cycling index for ecological applications. *Ecological Modelling*. 1984;25(1-3):69-83. https://doi.org/10.1016/0304-3800(84)90033-4

16. Zaitseva N.K., Garkusha K.E. Model of energy flows in livestock facilities. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*. 2002;2:89-93. (In Russ.) https://energy.bntu.by/jour/article/view/1329

17. Rakutko S.A., Rakutko E.N. Simulation and numerical analysis of energy-and-ecological compatibility of indoor plant lighting. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2019;13(3):11-17. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17

17. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н. Моделирование и численный анализ энергоэкологичности светокультуры // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2019. Т. 13, № 3. С. 11-17. https://doi.org/10.22314/20737599-2019-13-3-11-17

18. Фельдман О.В. Потоковые модели агроэкосистем // Математическое моделирование. 1999. Т. 11, № 10. С. 31-48. https://share.google/83HKqegwN6LhjQk9P

19. Ракутько С.А. От понятия потребительской энергетической системы к иерархической информационной модели искусственной биоэнергетической системы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2014. № 35. С. 312-318. EDN: SGOMDL

20. Ракутько Е.Н., Миронова Т.Ю., Гордеева Т.И., Васькин А.Н. Управление искусственной агроэкосистемой, утилизирующей стоки и выбросы животноводческих ферм // АгроЭкоИнженерия. 2024. № 2 (119). С. 71-82. EDN: HEIUSM

21. Fry J.P., Mailloux N.A., Love D.C., Milli M.C., Cao L. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? Environmental Research Letter. 2018;13(2):024017. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa273

18. Feldman O.V. Flow models of agricultural osystems. *Matematicheskoe modelirovanie*. 1999;11(10):31-48.

19. Rakutko S.A. From the concept of a consumer energy system to a hierarchical information model of an artificial bioenergy system. *Izvestiya Saint Petersburg State Agrarian University*. 2014(35):312-318. (In Russ.)

20. Rakutko E.N., Mironova T.Yu., Gordeeva T.I., Vaskin A.N. Management of an artificial agro-ecosystem, which utilizes wastewater and emissions from livestock farms. *AgroEkoInzheneriya*. 2024;2(119):71-82. (In Russ.) https://doi.org/10.24412/2713-2641-2024-2119-71-81

21. Fry J.P., Mailloux N.A., Love D.C. et al. Feed conversion efficiency in aquaculture: do we measure it correctly? *Environmental Research Letter*. 2018;13(2):024017. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa273

Информация об авторах

[1] **Ракутько Сергей Анатольевич,** д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве; sergej1964@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-2454-4534

[2] **Ракутько Елена Николаевна,** научный сотрудник отдела агроэкологии в животноводстве; elena.rakutko@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3536-9639

[1, 2] Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства (ИАЭП) – филиала ФГБНУ ФНАЦ ВИМ; 196634, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., 3

Author Information

Sergei A. Rakutko[1], DSc (Eng), Chief Research Engineer, Department of Agroecology in Livestock Production, sergej1964@yandex.ru; https://orcid.org/0000-0002-2454-4534

Elena N. Rakutko[2], Research Engineer, Department of Agroecology in Livestock Production; elena.rakutko@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-3536-9639

[1, 2] Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production (IEEP) – Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 3, Filtrovskoe Highway, Tyarlevo, Saint Petersburg, 196634, Russian Federation

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests and are responsible for plagiarism.

Статья поступила 08.04.2026, после рецензирования и доработки 18.05.2026, принята к публикации 21.05.2026

Received 08.04.2026; Revised 18.05.2026; Accepted 21.05.2026