

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ / PROCESSES AND MACHINES OF AGROENGINEERING SYSTEMS

УДК 631.371:574

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201903.366-382



Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве

И. А. Субботин*, А. Ю. Брюханов, Е. В. Тимофеев,
А. Ф. Эрк

Филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный
центр ВИМ» (г. Санкт-Петербург, Россия)

*itmo1652@mail.ru

Введение. В последнее время все чаще рассматривается вопрос о децентрализованном (автономном) энергообеспечении ряда нагрузок сельских территорий. Децентрализованное энергоснабжение возможно от различных генераторов энергии небольшой мощности с использованием местных и возобновляемых источников энергии. В этом случае у потребителя возникает задача выбора генерирующего источника.

Материалы и методы. Анализ потребителей энергии, режимы работы оборудования, графики нагрузок определены по результатам энергетических обследований, проводимых институтом с 2003 года по настоящее время. Комплексный показатель негативного воздействия производства тепло- и электроэнергии на окружающую среду определен методом логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова на основе экспертных оценок.

Результаты исследования. Энергоисточники могут быть как традиционными (дизель-генераторы и газопоршневые установки), так и возобновляемыми (ветроустановки, солнечные коллекторы, мини-ГЭС). При выборе источника энергии учитывается критерий отбора: экономия или экологичность. Экономический критерий – стоимость кВт·ч энергии. Экологический критерий – суммарный выброс загрязняющих веществ при получении энергии (г/кВт·ч) на различных источниках энергоснабжения. Причем учитывается не только количество выбросов, но и вредное воздействие на окружающую среду.

Обсуждение и заключение. При выборе источников энергоснабжения предлагается пользоваться коэффициентом энергоэкологичности, который представляет произведение стоимости кВт·ч полученной энергии на объем удельных выбросов загрязняющих веществ. Оптимальное значение этого коэффициента при выборе генерирующего источника – наименьшее. Коэффициент энергоэкологичности учитывает одновременно экономическую и экологическую целесообразность при выборе генерирующих источников энергии.

© Субботин И. А., Брюханов А. Ю., Тимофеев Е. В., Эрк А. Ф., 2019



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

Ключевые слова: энергообеспечение, автономное энергоснабжение, генерирующий источник, коэффициент энергоэкологичности

Для цитирования: Энергоэкологическая оценка использования различных генерирующих источников в сельском хозяйстве / И. А. Субботин [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 3. С. 366–382. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>

Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources

I. A. Subbotin*, A. Yu. Briukhanov, E. V. Timofeev, A. F. Erk
Federal Scientific Agroengineering Center VIM
(Saint Petersburg, Russia)

*itmo1652@mail.ru

Introduction. Recently the issue of decentralised (autonomous) power supply of certain rural consumers has been increasingly considered. Various small power generators using local and renewable energy sources can be applied for this purpose. So a consumer must choose the best-suited energy-generating source.

Materials and Methods. The findings of energy audits, which were conducted by the Institute from 2003 to the present day, were used to evaluate energy consumers and determine operation modes of equipment and load schedules. Complex index of the negative impact of heat and electricity generation on the environment was determined using the Spesivtsev – Drozdov method of logical-linguistic modelling based on expert assessments.

Results. Energy sources can be divided into traditional (diesel generators and gas generator plants) or renewable ones (wind turbines, solar collectors, mini hydro systems). Energy source is chosen either with the help of the economic criterion, being the cost of one k·Wh of energy or the criterion of environmental compatibility, or total specific emission of pollutants from energy generation at local generating sources (g/k·Wh). Here, not only the quantity of emissions, but also the harmful effect on the environment is considered.

Discussion and Conclusion. For the choice of energy supply sources, the coefficient of energy-ecological compatibility is proposed, being the product of the cost of one k·Wh of energy generated and specific emission of pollutants. The optimal value of this factor is the smallest, which accounts for both economic and environmental feasibility of energy generating sources.

Keywords: power supply, autonomous power supply, generating source, energy and environment index

For citation: Subbotin I.A., Briukhanov A.Yu., Timofeev E.V., Erk A.F. Energy and Environment Assessment of Agricultural Application of Power Generating Sources. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):366-382. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.366-382>

Введение

Современные сельхозпредприятия имеют большое количество мелких объектов энергопотребления: фермы, скотные дворы, административные здания, объекты послеуборочной обработки продукции растениеводства, склады, хранилища и т. п. [1]. Они расположены на разном удалении от источников

энергообеспечения. Централизованное электроснабжение осуществляется от трансформаторов небольшой мощности по воздушным линиям электропередач большой протяженности. Потребление электроэнергии не равномерно в течение суток, качество электроэнергии низкое, присутствуют большие потери энергии в сельских сетях [2].

В последнее время все чаще рассматривается вопрос о децентрализованном (автономном) энергообеспечении ряда нагрузок сельских территорий. Децентрализованное энергоснабжение возможно от различных генераторов энергии небольшой мощности с использованием местных и возобновляемых источников энергии. В этом случае у потребителя возникает задача выбора генерирующего источника [3].

Традиционно выбор источников энергоснабжения осуществляется по простейшим экономическим показателям: стоимость строительства, стоимость генерации энергии, экономический эффект и срок окупаемости. В то же время разные источники генерации, особенно автономные, работающие на возобновляемых источниках энергии и местного топлива, по-разному влияют на окружающую среду с точки зрения экологии. Например, дизель-генераторная электростанция имеет относительно небольшую стоимость, но характеризуется значительными выбросами загрязняющих веществ. Солнечная электростанция, наоборот, не засоряет окружающую среду (не считая занятых площадей, на которых она расположена), имеет большую стоимость, и в ряде случаев срок окупаемости солнечных фотоэлектрических станций соизмерим с периодом их эксплуатации. Кроме того, важен учет влияния всех существенных загрязнителей, образующихся в процессе выработки энергии с учетом степени их воздействия на окружающую среду. Данный аспект до сих пор мало исследован.

Целью работы является определение единого критерия при выборе источника энергоснабжения, учитывающего экономический и экологический эффекты на основании анализа структуры энергообеспечения сельскохозяйственных предприятий, стоимости мощностей и себестоимости электроэнергии с учетом удельного выброса загрязняющих веществ при выработке энергии.

Для решения поставленной проблемы необходимо определить перечень существенных (по объемам образования и наличию негативного воздействия) веществ-загрязнителей характерных для выработки тепло- и электроэнергии и определить весовые коэффициенты для каждого вещества-загрязнителя, демонстрирующие степень их воздействия на окружающую среду.

Обзор литературы

Анализу систем энергоснабжения сельскохозяйственного производства посвящены работы российских и зарубежных авторов: созданию демонстрационных зон системы энергоснабжения высокой эффективности [4], планированию нагрузки микросетей [5], закономерностям, тенденциям и факторам, влияющим на использование энергии в сельском хозяйстве [6]. Внимание ученых направлено на оптимизацию структуры энергоснабжения, управление энергией в сельской местности [7], рассматривается вопрос планирования связей между энергетическими ресурсами [8]. Вопросы децентрализованного энергообеспечения рассматриваются при выборе архитектуры энергоснабжения. Все больше исследовательского интереса уделяется технологиям «микросетей» и «умных сетей» [9]. В этих технологиях широко используют возобновляемые источники энергии: биоэнергетика [10–12], ветроэнергетика [13; 14], солнечная энергетика [15–17].

Выбор источника генерации энергии традиционно осуществляется по экономическому критерию. Так, когенерационные системы оцениваются по инвестиционным затратам и стоимости биомассы [18]. Выбор между традиционными и нетрадиционными системами энергоснабжения обычно производится по экономическим критериям [2; 19]. Одновременная оценка варианта энергоснабжения по экономическим и экологическим параметрам также привлекает внимание ученых [20]. Попытка в качестве оценки использо-

вать энергоэкологический коэффициент представлена в работах отечественных специалистов [21; 22]. Однако этот коэффициент проработан только для светокультуры. Использование солнечной энергии значительно сокращает загрязняющие выбросы [23]. Использование процессов пиролизного горения может потенциально минимизировать проблемы с выбросами [24]. Экономия энергии также значительно влияет на сокращение выбросов [25]. Оценка экономической и экологической устойчивости сельских территорий тесно связана с загрязняющими выбросами [26]. Таким образом, основным источником выбросов является выработка электроэнергии и использование транспортных средств [27].

Материалы и методы

Анализ потребителей энергии, режимы работы оборудования и графики нагрузок определены по результатам энергетических обследований [20]. Для определения значимости влияния всех существенных загрязнителей, образующихся в процессе выработки энергии, был использован метод логико-лингвистического моделирования Спесивцева – Дроздова на основе экспертных оценок¹. Это было обусловлено невозможностью точной оценки негативного влияния рассматриваемых веществ на все компоненты окружающей среды в целом и зависимость данного воздействия от многих факторов, делающих невыполнимым определение негативного воздействия экспериментальными методами. Выбранный способ исследования основывается на теории планирования эксперимента, математическом аппарате нечеткой логики и регрессионном анализе [28]. В соответствии с методом в качестве исходных для модели-

рования были использованы данные, полученные методом анкетирования пяти экспертов. Метод включает в себя следующую последовательность действий:

1) определение целевого показателя: зависимой переменной, ее размерности, диапазона значений и связи размерных значений с лингвистическими оценками;

2) определение факторного пространства, в котором эксперт принимает решение по данному конкретному вопросу и от которого зависит целевой показатель;

3) создание матрицы продукционных правил и заполнение ее экспертами, обладающими соответствующими знаниями и опытом в исследуемой предметной области;

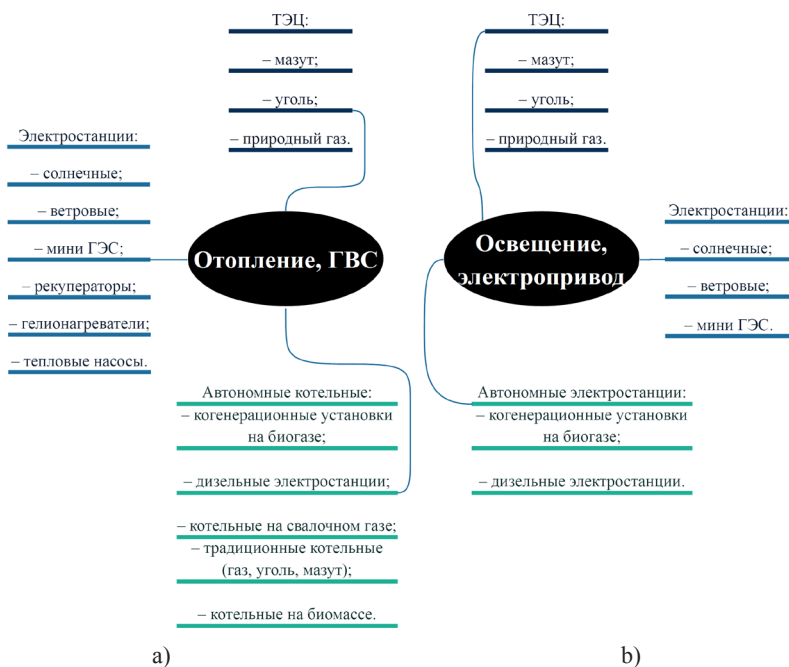
4) обработка экспертных оценок и построение целевой функции в аналитическом виде, отражающей зависимость целевого показателя от факторных переменных;

5) профессиональный анализ целевой функции с точек зрения математика и эксперта с целью извлечения новой информации об изучаемом явлении.

Результаты исследования

Электроэнергия в сельхозпредприятиях расходуется на освещение, электропривод, отопление и горячее водоснабжение [20]. Отопление и горячее водоснабжение обеспечиваются также от котельных, работающих на угле, мазуте, природном газе, биотопливе. Возможно использование для получения тепловой энергии тепловых насосов, гелиоводонагревателей и гелиовоздухонагревателей, рекуператоров. Автономное электроснабжение возможно от солнечных электростанций, ветроустановок, гидроэлектростанций и дизельных электростанций.

¹ Субботин И. А., Брюханов А. Ю. Рекомендации по планированию природоохранных инвестиций в интенсивном животноводстве. СПб.: ФГБНУ ИАЭП, 2016. URL: http://eco.szni.ru/IEEP_Guidelines_ERAB.pdf (дата обращения: 22.05.2019); Briukhanov A. Yu., Trifanov A. V., Spesivtsev A. V., Subbotin I. A. Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges // Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM. 2016, Pp. 164–166. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCM.2016.7519716>



Р и с. 1. Схема структуры энергообеспечения:
 а) для отопления и ГВС; б) для освещения, электроприводов, систем управления

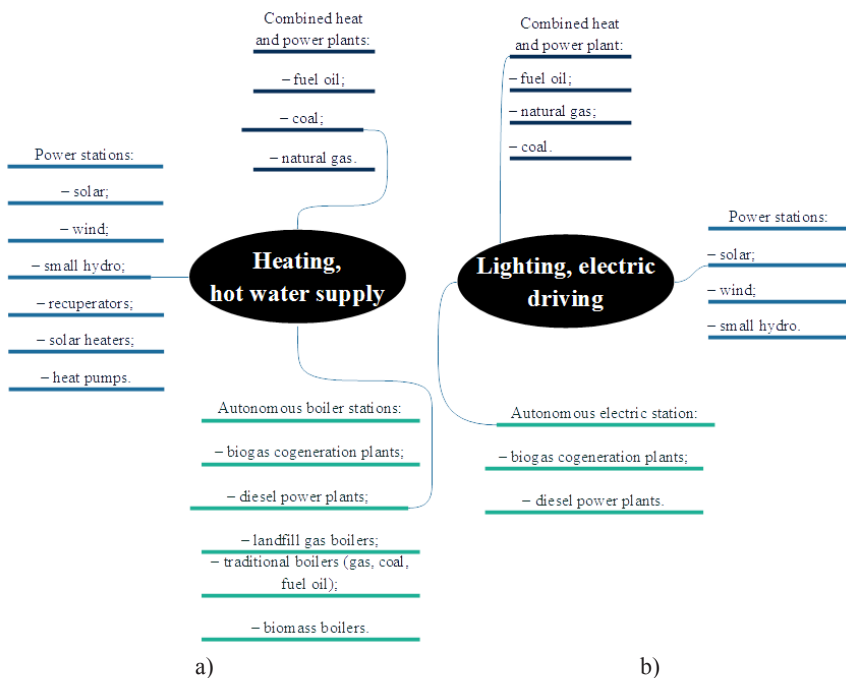


Fig. 1. Power supply structure diagram:
 a) for heating and hot water supply; b) for lighting, electric drives and control systems

Генерирующие объекты могут быть как традиционным (дизель-генераторы, газо-поршневые энергоустановки), так и возобновляемыми источниками энергии (ветроустановки, солнечные станции, микро-ГЭС). Использование ВИЭ снижает расход основного топлива (экономический эффект) и положительно отражается на экологических показателях.

Как было отмечено выше, при выборе источника энергии учитываются экономический или экологический критерии отбора. Экономический критерий – стоимость кВт·ч энергии (табл. 1). Экологический критерий – совокупный выброс загрязняющих веществ при получении энергии (г/кВт·ч) на различных источниках энергоснабжения [1; 15] (табл. 2).

При выборе источников энергоснабжения предлагается использовать коэффициент энергоэкологичности, представляющий произведение стоимости кВт·ч полученной энергии на объем удельных выбросов загрязняющих веществ. Оптимальное значение этого ко-

эффициента при выборе генерирующего источника – наименьшее [1]:

$$K_{э} = (C_c \cdot K_a + C_r) \cdot \sum \{Z_b \cdot K_{вв}\} \cdot Q, \quad (1)$$

где C_c – общая стоимость строительства источника генерации энергии; K_a – коэффициент амортизации; C_r – стоимость генерации энергии; Z_b – количество загрязняющих веществ; $K_{вв}$ – коэффициент вредного воздействия; Q – количество вырабатываемой энергии.

Например, при работе двух котельных на дровах и пеллетах (табл. 3) наименьший коэффициент энергоэкологичности – при генерации энергии от сжигания пеллет. Однако при этом стоимость кВт·ч выше, а удельные выбросы меньше. По коэффициенту экологичности предпочтительней использовать котельную на пеллетах.

Для объективной оценки важен учет влияния всех существенных загрязнителей, образующихся в процессе выработки энергии, с учетом значимости их влияния на окружающую среду. Значимость влияния определялась методом

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Ориентировочная стоимость мощностей и себестоимость электроэнергии
Estimated cost of power and cost of electricity

Источник генерации энергии / Energy-generating source	Инвестиции, тысяч рублей / кВт / Investments, thousand rubles / kW	Себестоимость, рублей / кВт·ч / Prime cost, rubles / kW·h
Котельная на угле / Coal boiler-plant	120	5,4
Котельная на газе / Gas boiler-plant	48	3,6
Малая гидроэнергетика / Small hydroelectric power plant	50	1,2–3,6
Котельная на биомассе / Biomass boiler-plant	13,6	4,6
Геотермальная станция / Geometrical power plant	150–300	3,9–18,5
Солнечная электростанция (Фотовольтаические) / Solar electric plant (Photovoltaic power station)	300	9–30,0
Ветровая электростанция / Wind-powered generating plant	82,2	2,2
Солнечная тепловая станция / Solar thermal station	93–135	9,8–12,6
Котельная на дровах / Firewood boiler-plant	32	2,7–4,9
Котельная на щепе / Chip boiler-plant	21	1,7–3,4
Котельная на пеллетах / Pellet boiler-plant	38	6,8–10

Т а б л и ц а 2

Table 2

Удельный выброс загрязняющих веществ (ЗВ) при выработке электрической и тепловой энергии на местных генерирующих источниках энергии (г/ кВт·ч)

Specific emission of pollutants in the generation of electrical and thermal energy on local generating energy sources (g/kW·h)

Источник генерации энергии / Energy-generating source	CO ₂	CO	Пыль / Dust	SO ₂	NO ₂	H ₂ S	Всего ЗВ / Total pollutants
Дизельная котельная / Diesel boiler-plant	6,8	0,3–0,6	0,04	8,0–10,5	1,8–3,2	0,05	19,1
Котельная на угле / Coal boiler-plant	9–10	0,3–1,0	0,4–1,4	6,0–12,5	3,0–7,5	6,0–9,0	37,4
Котельная на мазуте / Fuel oil boiler-plant	5,4	0,1–0,5	0,2–0,7	4,2–7,5	2,4–3,0	2,5–5,4	20,2
Котельная на дровах / Firewood boiler-plant	2,3	0,2–0,8	0,3–0,8	–	0,07	–	2,9
Котельная на пеллетах / Pellet boiler-plant	1,9	0,1–0,6	0,2–0,6	–	0,5	–	3,2
Котельная на щепе / Chip boiler-plant	1,3	0,1–0,5	0,5–1,3	–	0,2–1,3	–	3,4
Котельная на биогазе / Biogas boiler-plant	3,2	–	–	–	2,0–2,7	0,06	5,6
Котельная на природном газе / Natural gas boiler-plant	1,29	–	0,05	0,02	1,9–2,4	–	3,6

Т а б л и ц а 3

Table 3

Пример применения коэффициента энергоэкологичности

An example of the use of the energy-ecological coefficient

Вид топлива / Type of fuel	Стоимость кВт·ч (руб.) / Cost of kW·h (RUB)	Удельные выбросы грамм / кВт·ч / Specific emissions grams / kW·h	Коэффициент энергоэкологичности / Coefficient of energy and ecological compatibility
Дрова / Firewood	5,1	12,9	65,8
Пеллеты / Pellets	7,6	5,8	44,1

логики-лингвистического моделирования.

В качестве целевого был выбран комплексный показатель негативного воздействия производства тепловой и электроэнергии на окружающую среду – безразмерная величина, отражающая суммарный уровень воздействия всех веществ-загрязнителей, образующихся при выработке тепловой и электроэнергии на окружающую среду. Данный показатель может быть представлен следующим образом:

$$U_{pk} = \sum_i (x_i \times ku_i), \quad (2)$$

где U_{pk} – комплексный экологический ущерб от загрязнения; x_i – масса i -го вещества-загрязнителя, характеризующая производство энергии; ku_i – удельный коэффициент ущерба от загрязнения 1 г вещества-загрязнителя; i – количество значимых веществ-загрязнителей.

Таким образом, для решения задачи определения комплексного негативного воздействия на окружающую среду необходимо определить перечень зна-

чимых веществ-загрязнителей, и определить удельный показатель ущерба от 1 г вещества-загрязнителя.

На основании анализа литературных источников² был сформирован перечень негативных факторов влияния на окружающую среду, включающий в себя пыль и 5 существенных по объему образования и влиянию на окружающую среду веществ:

- 1) сероводород (H_2S);
- 2) оксиды азота (NO_x);
- 3) диоксид серы (SO_2);
- 4) взвешенные вещества (пыль);
- 5) монооксид углерода (CO);
- 6) диоксид углерода (CO_2).

Выражение (2) в данном случае принимает вид:

$$U_{pk} = ku_1x_1 + ku_2x_2 + ku_3x_3 + ku_4x_4 + ku_5x_5 + ku_6x_6. \quad (2)$$

Для выявления значений ku_i был использован метод логико-лингвисти-

ческого моделирования, состоящий из формирования матрицы сочетаний факторных переменных, заполнения матрицы экспертными данными и обработки данных методами регрессионного анализа³ [10].

В соответствии с выбранным методом была сформирована матрица из 32 сочетаний граничных значений факторных переменных (табл. 4).

Граничные значения факторных переменных имеют следующий смысл: 0 – минимальный объем образования загрязняющего вещества; 1 – максимальный объем.

Для каждого из сочетаний факторных значений данной матрицы было получено экспертное значение, причем эксперт оценивал комплексный экологический ущерб от загрязнения по шкале от 0 до 1, где 0 – минимально возможный ущерб; 1 – максимально возможный ущерб. Результаты экспертного оценивания приведены в таблице 5 (значения $Y_{эсп}$).

Таблица 4

Table 4

Матрица сочетаний факторных значений
Matrix of combinations of factor values

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	Y
1	0	0	0	0	0	0	–
2	1	0	0	0	0	1	–
3	0	1	0	0	0	1	–
4	1	1	0	0	0	0	–
5	0	0	1	0	0	1	–
–	–	–	–	–	–	–	–
30	1	0	1	1	1	0	–
31	0	1	1	1	1	0	–
32	1	1	1	1	1	1	–

² Там же; **Subbotin I., Vasilev E.** Formalization of Criteria for Determining Best Available Technologies: the Case of Russia // *Engineering For Rural Development*. 2016. Pp. 845–850.

³ **Briukhanov A. Yu., Trifanov A. V., Spesivtsev A. V., Subbotin I. A.** Logical-Linguistic Modeling in Addressing Agro-Environmental Challenges.

Т а б л и ц а 5
T a b l e 5

Экспертные (оценочные) и расчетные значения целевой функции
Expert (estimated) and calculated values of the objective function

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	$Y_{\text{эсп}}$	$Y_{\text{расч}}$
0	0	0	0	0	0	0,00000	0,000000
1	0	0	0	0	1	0,90625	0,927371
0	1	0	0	0	1	0,90625	0,928835
1	1	0	0	0	0	0,00000	0,001528
0	0	1	0	0	1	0,93750	0,941062
1	0	1	0	0	0	0,00000	0,013755
0	1	1	0	0	0	0,00000	0,015220
1	1	1	0	0	1	0,93750	0,942591
0	0	0	1	0	1	0,93750	0,943801
1	0	0	1	0	0	0,00000	0,016494
0	1	0	1	0	0	0,00000	0,017958
1	1	0	1	0	1	0,93750	0,945329
0	0	1	1	0	0	0,00000	0,030185
1	0	1	1	0	1	0,93750	0,957556
0	1	1	1	0	1	0,93750	0,959021
1	1	1	1	0	0	0,03125	0,031714
0	0	0	0	1	1	0,93750	0,968286
1	0	0	0	1	0	0,03125	0,040979
0	1	0	0	1	0	0,03125	0,042444
1	1	0	0	1	1	0,96875	0,969815
0	0	1	0	1	0	0,03125	0,054671
1	0	1	0	1	1	0,96875	0,982042
0	1	1	0	1	1	0,96875	0,983506
1	1	1	0	1	0	0,03125	0,056199
0	0	0	1	1	0	0,03125	0,057409
1	0	0	1	1	1	0,96875	0,984780
0	1	0	1	1	1	0,96875	0,986245
1	1	0	1	1	0	0,03125	0,058938
0	0	1	1	1	1	0,96875	0,998472
1	0	1	1	1	0	0,06250	0,071165
0	1	1	1	1	0	0,06250	0,072629
1	1	1	1	1	1	1,00000	1,000000

По результатам регрессионного анализа была получена следующая формула:

$$Y = 0,000031841x_1 + 0,001496529x_2 + 0,013723492x_3 + 0,016461823x_4 + 0,04094759x_5 + 0,927338725x_6. \quad (3)$$

Расчетные значения по полученной формуле приведены в таблице 5 (столбец $Y_{\text{расч}}$).

Весовые коэффициенты каждой переменной отражают значимость фактора с точки зрения негативного воздействия на окружающую среду. Поскольку для целей исследования представляет интерес сравнительная оценка ущерба от загрязнителей при выработке теплоты и электроэнергии, для более удобного восприятия все весовые коэффициенты были умножены на 31406 (наименьший весовой коэффициент стал равен 1), при этом отношения между коэффициентами не изменились, поэтому их смысл, позволяющий оценить относительную значимость, остался прежним.

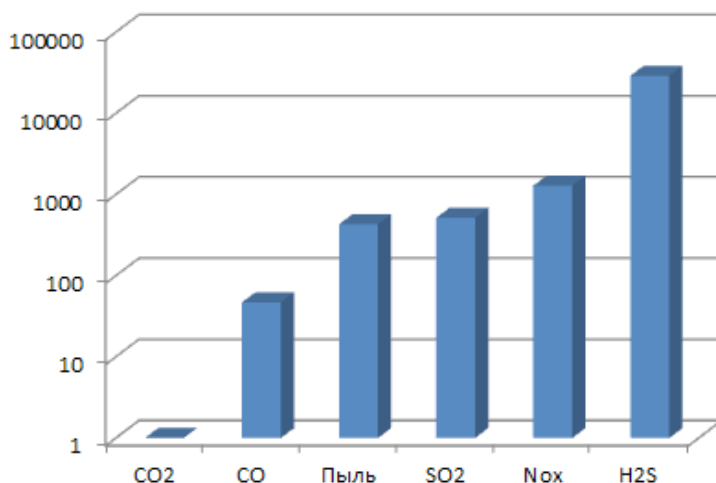
В результате было получено следующее полиномиальное выражение:

$$U_{pk} = x_1 + 47x_2 + 431x_3 + 517x_4 + 1286x_5 + 29124x_6. \quad (4)$$

Полученные значения ku_1 позволяют оценить значимость негативного влияния веществ-загрязнителей на окружающую среду. Так, можно сделать вывод о том, что наибольшее негативное воздействие на окружающую среду оказывает сероводород (H_2S), а наименьшее – диоксид углерода (CO_2). Также, сравнивая между собой весовые коэффициенты, можно определить относительную значимость с точки зрения негативного воздействия на окружающую среду: например, весовой коэффициент оксидов азота в 9,17 раз больше коэффициента диоксида серы; это означает, что оксиды азота оказывают в 9,17 раз больше негативного влияния на окружающую среду, чем та же масса диоксида серы.

Полученные данные согласуются с данными о классе опасности и ПДК из действующих нормативных документов (табл. 6; рис. 2).

Определение коэффициентов значимости загрязнителей позволяет использовать уравнение (4) для достоверной экологической оценки выработки энергии в зависимости от структуры образующихся веществ-загрязнителей.



Р и с. 2. Сравнение коэффициентов значимости с точки зрения негативного воздействия на окружающую среду

Т а б л и ц а 6
T a b l e 6

**ПДК (мг/м³), классы опасности и коэффициенты значимости
для рассматриваемых факторов загрязнения**
**Maximum permissible concentration (mg/m³), hazard classes and significance coefficients
for the substances under consideration**

Нормативный документ / Regulatory document	CO ₂	CO	Пыль / Dust	SO ₂	NO _x	H ₂ S
ГН 2.2.5.2100-06 (ПДК в рабочей зоне) / GN 2.2.5.2100-06 (maximum permissible concentration in working area)	27000					
ГН 2.2.5.1313-03 (ПДК в рабочей зоне) / GN 2.2.5.1313-03 (maximum permissible concentration in working area)		20			5 (в пере- счете на NO / based on nitrogen monoxide)	10
ГОСТ 12.1.005-88 (ПДК в рабочей зоне) / (maximum permissible con- centration in working area)		20			5 (в пере- счете на NO / based on nitrogen monoxide)	10
ГН 2.1.6.1338-03 (ПДК в воздухе населенных пунктов) / GN 2.1.6.1338- 03 (maximum permissible concentration in the air of settlements)		5	0,5	0,5		0,008
Класс опасности / class of hazard	4	4	3	3	3	2
Полученные коэффициенты значимости / The obtained coefficients of significance	1	47	431	517	1286	29124

Обсуждение и заключение

Коэффициент энергоэкологичности может быть критерием при выборе источника в автономных системах энергоснабжения, который представляет производство стоимости кВт·ч полученной энергии на объем удельных выбросов загрязняющих веществ. Оптимальное значение этого коэффициента при выборе генерирующего источника – наименьшее. Коэффициент энергоэкологичности учитывает одновременно экономическую и экологическую целесообразность при выборе генерирующих источников энергии.

Определен перечень существенных (по объемам образования и наличию негативного воздействия) веществ-загрязнителей, характеризующих выработку тепло- и электроэнергии, включающий 6 веществ. Определены весовые коэффициенты для каждого вещества-загрязнителя, которые демонстрируют их степень воздействия на окружающую среду. Предложен способ сравнения и оценки различных видов топлива для выработки энергии с точки зрения комплексного воздействия образующихся веществ-загрязнителей на окружающую среду.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тимофеев Е. В., Эрк А. Ф., Судаченко В. Н., Размук В. А. Оптимизация схем энергообеспечения современных сельскохозяйственных предприятий // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2018. № 1 (94). С. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10008>
2. Судаченко В. Н., Эрк А. Ф., Тимофеев Е. В. Выбор варианта энергоснабжения объектов сельхозпроизводства по экономическим критериям // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 92. С. 43–48. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-varianta-energospabzheniya-obektov-selhozproduktstva-po-ekonomicheskim-kriteriyam> (дата обращения: 22.05.2019).
3. Бровцин В. Н., Эрк А. Ф., Бычкова О. В. Анализ энергоэффективности сельскохозяйственных предприятий молочного направления // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 5. С. 22–24. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-energoeffektivnosti-predpriyatiy-molochnogo-napravleniya> (дата обращения: 22.05.2019)
4. Эрк А. Ф., Судаченко В. Н., Бутримова Е. И. Принципы создания демонстрационной зоны высокой энергоэффективности сельскохозяйственных предприятий в Ленинградской области // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 88. С. 46–53. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsiipy-sozdaniya-demonstratsionnoy-zony-vysokoy-energoeffektivnosti-selskhozaystvennyh-predpriyatiy-v-leningradskoy-oblasti> (дата обращения: 22.05.2019).
5. Lu X., Zhou K., Zhang X. A Systematic Review of Supply and Demand Side Optimal Load Scheduling in a Smart Grid Environment // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 203. Pp. 757–768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.301>
6. Ghisellini P., Setti M., Ulgiati S. Energy and Land Use in Worldwide Agriculture: an Application of Life Cycle Energy and Cluster Analysis // Environment Development and Sustainability. 2016. Vol. 18, Issue 3. Pp. 799 – 837. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9678-2>
7. Naz M. N., Naeem N., Iqbal M., Imran M. Economically Efficient and Environment Friendly Energy Management in Rural Area // Journal of Renewable and Sustainable Energy. 2017. Vol. 9, Issue 1. Pp. 800–833. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4973713>
8. Sustainable Planning of the Energy-Water-Food Nexus Using Decision Making Tools / N. Bieber [et al.] // Energy Policy. 2018. Vol. 113. Pp. 584–607. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.037>
9. Zhonglin Ch., Guangchao G., Quanyuan J., Guerrero J. M. Energy Management of Chp-Based Microgrid with Thermal Storage for Reducing Wind Curtailment // Journal of Energy Engineering. 2018. Vol. 144, Issue 6. Pp. 700–723. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000583](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000583)
10. Ardebili S., Khademalrasoul A. An Analysis of Liquid-Biofuel Production Potential From Agricultural Residues and Animal Fat (Case Study: Khuzestan Province) // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 204. Pp. 819–831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.031>
11. Stich J., Ramachandran S., Hamacher T., Stimming U. Techno-Economic Estimation of the Power Generation Potential from Biomass Residues in Southeast Asia // Energy. 2017. Vol. 135. Pp. 930–942. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.162>
12. Malladi K. T., Sowlati T. Biomass Logistics: A Review of Important Features, Optimization Modeling and the New Trends // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 94. Pp. 587–599. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.052>
13. Xu J. Z., Assenova A., Erokhin V. Renewable Energy and Sustainable Development in a Resource-Abundant Country: Challenges of Wind Power Generation in Kazakhstan // Sustainability. 2018. Vol. 10, Issue 9. Article ID 3315. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093315>
14. Economic Evaluation of Renewable Energy Systems for the Optimal Planning and Design in Korea / Chung M. [et al.] // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2018. Vol. 6, Issue 4. Pp. 725–741. DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdwes.d6.0216>

15. **Иванов Г. А., Бобьль А. В., Ершенко Е. М., Теруков Е. И.** Особенности эксплуатации солнечной автономной гибридной энергоустановки в условиях Северо-Западного Федерального округа // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 10. С. 63–67. URL: <https://docplayer.ru/53559049-Osobennosti-ekspluatatsii-solnechnoy-avtonomnoy-gibridnoy-energoustanovki-v-usloviyah-severozapadnogo-federalnogo-okruga.html> (дата обращения: 22.05.2019).

16. Техничко-экономические аспекты сетевой солнечной энергетики в России / А. В. Бобьль [и др.] // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 4. С. 85–92. URL: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27207> (дата обращения: 22.05.2019).

17. Flexible Photovoltaic Modules Based on Amorphous Hydrogenated Silicon / G. Ablyayev [et al.] // Semiconductors. 2015. Vol. 49, Issue 5. Pp. 679–682. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063782615050024> (дата обращения: 22.05.2019).

18. **Pfeifer A., Dominkovic D., Cosic B., Ducic N.** Economic Feasibility of CHP Facilities Fueled by Biomass from Unused Agriculture Land: Case of Croatia // Energy Conversion And Management. 2016. Vol. 125. Pp. 222–229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.090>

19. **Судаченко В. Н., Эрк А. Ф., Тимофеев Е. В.** Обоснование критерия экономической эффективности совместного использования традиционных и возобновляемых энергоисточников // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 92. С. 35–43. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kriteriya-ekonomicheskoy-effektivnosti-sovmestnogo-ispolzovaniya-traditsionnyh-i-vozobnovlyаемых-energoistochnikov> (дата обращения: 22.05.2019).

20. **Эрк А. Ф., Судаченко В. Н., Размук В. А., Ковалева О. В.** Результаты энергетического обследования сельхозпредприятий // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2014. № 85. С. 100–105. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-energeticheskogo-obsledovaniya-selskokozyaystvennyh-predpriyatiy> (дата обращения: 22.05.2019).

21. **Ракутько С. А., Маркова А. Е., Мишанов А. П., Ракутько Е. Н.** Энергоэкология светокультуры – новое междисциплинарное научное направление // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2016. № 90. С. 14–27. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoekologiya-svetokultury-novoe-mezhdistsiplinarnoe-nauchnoe-napravlenie> (дата обращения: 22.05.2019).

22. Оценка экологичности и энергоэффективности предприятия АПК с помощью иерархической модели искусственной биоэнергетической системы / С. А. Ракутько [и др.] // Региональная экология. 2015. № 6 (41). С. 58–66.

23. **Shahsavari A., Akbari M.** Potential of Solar Energy in Developing Countries for Reducing Energy-Related Emissions // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 90. Pp. 275–291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>

24. Emission Characteristics of a Pyrolysis-Combustion System for the Co-Production of Biochar and Bioenergy from Agricultural Wastes / L. Dunnigan [et al.] // Waste Management. 2018. Vol. 77. Pp. 59–66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.004>

25. Energy Savings, Emission Reductions, and Health Co-Benefits of the Green Building Movement / P. MacNaughton [et al.] // Journal Of Exposure Science And Environmental Epidemiology. 2018. Vol. 28 (4). Pp. 307–318. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41370-017-0014-9>

26. Assessing the Economic and Environmental Sustainability of a Regional Air Quality Plan / C. Carnevale [et al.] // Sustainability. 2018. Vol. 10, Issue 10. Article ID 3568. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103568>

27. Air Quality, Primary Air Pollutants and Ambient Concentrations Inventory for Romania / G. Nastase [et al.] // Atmospheric Environment. 2018. Vol. 184. Pp. 292–303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.034>

28. **Субботин И. А.** Повышение экологической безопасности утилизации навоза на основе принципов НДТ // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 92. С. 186–192. URL: <https://cyberleninka.ru/>

article/n/povyshenie-ekologicheskoy-bezopasnosti-utilizatsii-navoza-na-osnove-printsipov-ndt (дата обращения: 22.05.2019).

Поступила 22.02.2019; принята к публикации 20.03.2019; опубликована онлайн 30.09.2019

Об авторах:

Брюханов Александр Юрьевич, заведующий отделом инженерной экологии сельскохозяйственного производства, главный научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), доктор технических наук, профессор РАН, ResearcherID: B-7550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, sznii@yandex.ru

Субботин Игорь Александрович, научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), ResearcherID: L-6130-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-9385>, itmo1652@mail.ru

Тимофеев Евгений Всеволодович, старший научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: C-2502-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9022-0183>, demon_zht84@mail.ru

Эрк Андрей Федорович, ведущий научный сотрудник, Институт агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, филиал ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (196625, Россия, г. Санкт-Петербург, п. Тярлево, Фильтровское ш., д. 3), кандидат технических наук, ResearcherID: C-2518-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4394-4322>, 4666866@bk.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. Ю. Брюханов – научное руководство, постановка задачи и формулирование концепции статьи; И. А. Субботин – методика, результаты и обсуждение; Е. В. Тимофеев – введение и обзор литературы; А. Ф. Эрк – методика, результаты и обсуждение, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Timofeev E.V., Erk A.F., Sudachenko V.N., Razmuk V.A. Optimization of Power Supply Schemes of Modern Agricultural Enterprises. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2018; (1):63-71. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10008>
2. Sudachenko V.N., Erk A.F., Timofeev E.V. Selection of Power Supply Options for Agricultural Production Facilities by Economic Criteria. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2017; (92):43-48. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-varianta-energospabzheniya-obektov-selhozproizvodstva-po-ekonomicheskim-kriteriyam> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
3. Brovtin V.N., Erk A.F., Bychkova O.V. Analysis of Energy Efficiency of Dairy Farms. *Mekhanizatsiya i ehlektrifikatsiya selskogo hozyaistva* = Mechanisation and Electrification of Agriculture. 2014; (5):22-24. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-energoeffektivnosti-predpriyatij-molochnogo-napravleniya> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)

4. Erk A.F., Sudachenko V.N., Butrimova E.I. Creation of Demonstration Zones of High Energy Performance of Agricultural Enterprises in Leningrad Region. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2016; (88):46-53. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/printsipy-sozdaniya-demonstratsionnoy-zony-vysokoy-energoeffektivnosti-selskohozyaystvennyh-predpriyatiy-v-leningradskoy-oblasti> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
5. Lu X., Zhou K., Zhang X. A Systematic Review of Supply and Demand Side Optimal Load Scheduling in a Smart Grid Environment. *Journal of Cleaner Production*. 2018; 203:757-768. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.301>
6. Ghisellini P., Setti M., Ulgiati S. Energy and Land Use in Worldwide Agriculture: An Application of Life Cycle Energy and Cluster Analysis. *Environment Development and Sustainability*. 2016; 18(3):799-837. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-015-9678-2>
7. Naz M.N., Naem N., Iqbal M., Imran N. Economically Efficient and Environment Friendly Energy Management in Rural Area. *Journal Of Renewable And Sustainable Energy*. 2017; 9(1):800-833. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4973713>
8. Bieber N., Ker J.H., Wang X.N., et al. Sustainable Planning of the Energy-Water-Food Nexus Using Decision Making Tools. *Energy Policy*. 2018; 113:584-607. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.037>
9. Zhonglin Ch., Guangchao G., Quanyuan J., Guerrero J.M. Energy Management of Chp-Based Microgrid with Thermal Storage for Reducing Wind Curtailment. *Journal of Energy Engineering*. 2018; 144(6):700-723. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000583](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000583)
10. Ardebili S., Khademalrasoul A. An Analysis of Liquid-Biofuel Production Potential from Agricultural Residues and Animal Fat (Case Study: Khuzestan Province). *Journal of Cleaner Production*. 2018; 204:819-831 (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.031>
11. Stich J., Ramachandran S., Hamacher T., Stimming U. Techno-Economic Estimation of the Power Generation Potential from Biomass Residues in Southeast Asia. *Energy*. 2017; 135:930-942. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.162>
12. Malladi K.T., Sowlati T. Biomass Logistics: A Review of Important Features, Optimization Modeling and the New Trends. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2018; 94:587-599. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.052>
13. Xu J.Z., Assenova A., Erokhin V. Renewable Energy and Sustainable Development in a Resource-Abundant Country: Challenges of Wind Power Generation in Kazakhstan. *Sustainability*. 2018; 10(9):3315. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093315>
14. Chung M., Shin K.Y., Jeoune D.S. Economic Evaluation of Renewable Energy Systems for the Optimal Planning and Design in Korea. *Journal of Sustainable Development of Energy Water and Environment Systems*. 2018; 6(4):725-741. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0216>
15. Ivanov G.A., Bobyl A.V., Ershenko E.M., Terukov E.I. Operation of an Autonomous Hybrid Solar Power Plant in the Northwestern Federal District of Russia. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* = The Russian Journal of Applied Physics. 2014; 84(10):63-67. Available at: <https://docplayer.ru/53559049-Osobennosti-ekspluatatsii-solnechnoy-avtonomnoy-gibridnoy-energoustanovki-v-usloviyah-severozapadnogo-federalnogo-okruga.html> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
16. Bobyl A.V., Kiseleva S.V., Kochakov V.D., et al. Engineering and Economic Features of Grid Solar Energy in Russia Technical Physics. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* = The Russian Journal of Applied Physics. 2014; 84(4):85-92. Available at: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/27207> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
17. Ablayev G.M., Abramov A.S., Nyapshaev I.A., et al. Flexible Photovoltaic Modules Based on Amorphous Hydrogenated Silicon. *Semiconductors*. 2015; 49(5):679-682. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063782615050024> (accessed 22.05.2019). (In Eng.)
18. Pfeifer A., Dominkovic D., Cosic B., Duic N. Economic Feasibility of CHP Facilities Fueled by Biomass from Unused Agriculture Land: Case of Croatia. *Energy Conversion and Management*. 2016; 125:222-229. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.090>

19. Sudachenko V.N., Timofeev E.V., Timofeev E.V. Justification Criterion of Economic Efficiency of Joint Use of Traditional and Renewable Energy Sources. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2017; (92):35-43. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kriteriya-ekonomicheskoy-effektivnosti-sovmestnogo-ispolzovaniya-traditsionnyh-i-vozobnovlyaemyh-energoistoknikov> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
20. Erk A.F., Sudachenko V.N., Rasmuk V.A., Kovaleva O.V. Results of Energy Survey of Agricultural Enterprises. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2014; (85):100-105. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-energeticheskogo-obsledovaniya-selskohozyaystvennyh-predpriyatiy> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
21. Rakutko S.A., Markova A.E., Mishanov A.P., Rakutko E.N. Energy and Ecological Efficiency of Indoor Plant Lighting as a New Interdisciplinary Research Area. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2016; (90):14-27. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoekologiya-svetokultury-novoe-mezhdistsiplinarnoe-nauchnoe-napravlenie> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)
22. Rakutko S.A., Brovtin V.N., Mishanov A.P., et al. Assessment of Environmental Friendliness and Energy Efficiency of the Enterprise of Agro-Industrial Complex with the Help of a Hierarchical Model of an Artificial Bioenergy System. *Regionalnaya ekologiya* = Regional Ecology. 2015; (6):58-66. (In Russ.)
23. Shahsavari A., Akbari M. Potential of Solar Energy in Developing Countries for Reducing Energy-Related Emissions. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2018; 90:275-291. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.065>
24. Dunnigan L., Morton B., Ashman P., et al. Emission Characteristics of a Pyrolysis-Combustion System for the Co-Production of Biochar and Bioenergy from Agricultural Wastes. *Waste Management*. 2018; 77:59-66. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.004>
25. MacNaughton P., Cao X., Buonocore J., et al. Energy Savings, Emission Reductions, and Health Co-Benefits of the Green Building Movement. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*. 2018; 28(4):307-318. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1038/s41370-017-0014-9>
26. Carnevale C., Ferrari F., Guariso G., et al. Assessing the Economic and Environmental Sustainability of a Regional Air Quality Plan. *Sustainability*. 2018; 10(10):3568. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/su10103568>
27. Nastase G., Serban A., Nastase A., et al. Air Quality, Primary Air Pollutants and Ambient Concentrations Inventory for Romania. *Atmospheric Environment*. 2018; 184:292-303. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.04.034>
28. Subbotin I.A. Improvement of Environmental Safety of Manure Utilisation Based on BAT Principles. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanised Crop and Livestock Production. 2017; (92):186-192. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-ekologicheskoy-bezopasnosti-utilizatsii-navoza-na-osnove-printsipov-ndt> (accessed 22.05.2019). (In Russ.)

Received 22.02.2019; revised 20.03.2019; published online 30.09.2019

About authors:

Aleksandr Yu. Briukhanov, Chief Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor of RAS, ResearcherID: B-7550-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4963-3821>, sznii@yandex.ru

Igor A. Subbotin, Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), ResearcherID: L-6130-2015, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6189-9385>, itmo1652@mail.ru

Evgeniy V. Timofeev, Senior Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: C-2502-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9022-0183>, demon_zht84@mail.ru

Andrey F. Erk, Leading Researcher, Institute for Engineering and Environmental Problems in Agricultural Production, Branch of Federal Scientific Agroengineering Center VIM (3 Filtrovskoye Shosse, Tyarlevo, Saint Petersburg 196625, Russia), Ph.D. (Engineering), ResearcherID: C-2518-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4394-4322>, 4666866@bk.ru

Contribution of the authors:

A. Yu. Briukhanov – academic supervision, formulation of the problem and the paper concept; I. A. Subbotin – methods, results and discussion; E. V. Timofeev – introduction and literature review; A. F. Erk – methods, results and discussion, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.