

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ АПК

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 697.921.47

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-4-9>

Теплоутилизационная установка: повышение энергоэффективности

Н.А. Шевкун¹, И.Ю. Игнаткин², Н.Г. Кожевникова³, В.А. Шевкун⁴, А.В. Драный⁵^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия¹ energo-shevkun@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>² ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>³ energo-ngk@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>⁴ vshevkun@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>⁵ energo-dranyu@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>

Аннотация. Рекуперативная теплоутилизационная установка обеспечивает снижение затрат на отопление производственных животноводческих помещений. Однако существующие конструкции отличаются неравномерностью распределения воздушного потока по поверхности теплообменника и не гарантируют полную утилизацию теплоты вытяжного воздуха. С целью решения данной проблемы на примере рекуперативной теплоутилизационной установки УТ-3000 рассмотрена возможность ее дооснащения аэродинамической решеткой. Проведен анализ применимости аэродинамической решетки. В качестве оптимизационного параметра учитывалась величина хорды лопадки. Вычисленные потери давления на участке «Вентилятор-поддон-теплообменник» показали, что аэродинамическая решетка с «нормальным» числом лопаток обеспечивает минимальные потери давления воздушного потока 0,73 Па, что на 58% меньше, чем в исполнении без аэродинамической решетки. Для последующего экспериментального исследования равномерного распределения воздушного потока по поверхности теплообменника и повышения энергоэффективности функционирования теплоутилизационной установки необходимо изготовить теплоутилизатор с аэродинамической решеткой, учитывая рекомендуемый диапазон «нормальных» чисел лопаток от 16 до 21, дугу окружности лопадки 95° и угол установки лопаток к диагонали в пределах 68...82°.

Ключевые слова: повышение энергоэффективности, теплоутилизационная установка, УТ-3000, микроклимат, потери давления, аэродинамическая решетка, число лопаток

Для цитирования: Шевкун Н.А., Игнаткин И.Ю., Кожевникова Н.Г., Шевкун В.А., Драный А.В. Теплоутилизационная установка: повышение энергоэффективности // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 6. С. 4-9. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-4-9>.

ORIGINAL PAPER

Heat recovery plant: ways to improve energy efficiency

N.A. Shevkun¹, I.Yu. Ignatkin², N.G. Kozhevnikova³, V.A. Shevkun⁴, A.V. Draniy⁵^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia¹ energo-shevkun@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>² ignatkin@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>³ energo-ngk@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>⁴ vshevkun@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>⁵ energo-dranyu@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>

Abstract. One of the ways to reduce the cost of heating production facilities in animal husbandry is the use of regenerative heat recovery plants. However, the existing designs of heat exchangers have a number of design flaws affecting their functionality, in particular, the uneven distribution of the air flow over the surface of a heat exchanger. This, in turn, does not provide for a more complete utilization of exhaust air heat. Using the example of a recuperative heat recovery unit UT-3000, the authors consider the possibility of retrofitting it with an aerodynamic

grid to evenly distribute the exhaust air flow over the heat exchanger surface and reduce energy costs for its operation. To do this, they analyzed the applicability of the aerodynamic grid. The size of a blade chord was taken into account as an optimisation parameter. The pressure losses calculated on the “fan – pallet – heat exchanger” section showed that the use of an aerodynamic grid with a “normal” number of blades would create a minimum airflow pressure loss of 0.73 Pa, which is 58% less than in the version without an aerodynamic grid. Further experimental study of the uniform airflow distribution over the heat exchanger surface aimed at improving the energy efficiency of the heat recovery unit requires a new design of a heat exchanger with an aerodynamic grid, taking into account the recommended range of “normal” number of blades from 16 to 21, the blade circumference arc of 95° and the blade pitch angle ranging between 68 and 82° .

Keywords: energy efficiency improvement, heat recovery plant, UT-3000, indoor climate, pressure loss, aerodynamic grid, number of blades

For citation: Shevkun N.A., Ignatkin I.Yu., Kozhevnikova N.G., Shevkun V.A., Draniy A.V. Heat recovery plant: ways to improve energy efficiency. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(6):4-9. (In Rus.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-6-4-9>.

Введение. Снижение энергетических затрат на отопление производственных помещений возможно за счет утилизации теплоты вытяжного воздуха с помощью рекуперативных теплоутилизационных установок [1, 2]. На практике встречаются различные технические решения компоновки теплоутилизационных установок как зарубежных, так и отечественных производителей. Одним из оригинальных технических решений отечественного производства является рекуперативная теплоутилизационная установка УТ-3000 [3].

Функционирование рекуперативной теплоутилизационной установки должно обеспечивать поддержание требуемых параметров микроклимата в животноводческом помещении с минимальными затратами энергии и максимальной утилизацией теплоты удаляемого из помещения воздуха в холодные периоды года.

В ходе функционирования теплоутилизационной установки УТ-3000 удаляемый из помещения воздух вытяжным вентилятором нагнетается в поддон, пройдя через который, направляется в теплообменник, где отдает свою теплоту приточному воздуху, и далее отводится в атмосферу. Особый интерес заслуживает перемещение воздушного потока на участке «Вентилятор-поддон-теплообменник», на котором истекающий с лопаток вентилятора вытяжной воздух образует закрученный турбулентный поток, совершающий при своем перемещении резкий поворот на 90° в сторону теплообменника. При резком повороте воздушный поток дополнительно турбулизуется вследствие возникновения вихревой области у внутренней стенки теплообменника и смещения поля скоростей к его внешней стенке, что вызывает неравномерное распределение воздушного потока по поверхности теплообменника и увеличивает значение потерь давления [4, 5] (рис. 1), которые закладываются в энергетические затраты функционирования установки.

Снижение энергетических затрат и повышение качества утилизации теплоты возможны за счет снижения потерь давления воздушного потока [6] в каналах теплоутилизационной установки и обеспечения его равномерного распределения по поверхности рекуператора.

Цель исследований: разработка технического решения для равномерного распределения воздушного потока по поверхности теплообменника и повышения энергоэффективности функционирования теплоутилизационной установки.

Материалы и методы. Предполагается, что минимизировать потери давления воздушного потока на участке «Вентилятор-поддон-теплообменник», обеспечить равномерность его распределения по теплообменнику можно посредством установки

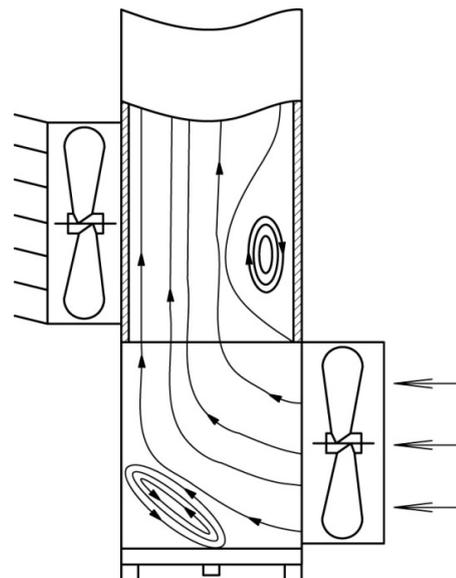


Рис. 1. Схема распределения воздушного потока по поверхности теплообменника

Fig. 1. Diagram of air flow distribution over the heat exchanger surface

аэродинамической решетки, состоящей из направляющих лопаток, установленных в вертикальной плоскости поддона по его диагонали (рис. 2).

Для решения поставленной задачи необходимо определить конструктивные параметры предлагаемой аэродинамической решетки.

Анализ литературы показал, что аэродинамические решетки довольно широко применяются в воздуховодах систем вентиляции. Применяемые в решетках лопатки могут быть профилированными, тонкими, концентрическими и разрезными¹. Наиболее простыми в изготовлении являются тонкие лопатки, поэтому рационально рассмотреть возможность их применения в конструкции аэродинамической решетки теплоутилизационной установки. Количество лопаток, монтируемых в коленах, может быть «нормальным», минимальным или сокращенным. В большинстве практических случаев ограничиваются использованием минимального или сокращенного числа лопаток¹, а для обеспечения равномерного распределения воздушного потока сразу за поворотом рекомендуется применять решетки с «нормальным» числом лопаток.

Для обоснования целесообразности использования аэродинамической решетки и выбора количества лопаток применительно к теплоутилизационной установке УТ-3000 определим потери давления вытяжного воздуха в ее поддоне на различных режимах работы с учетом допущения, что участок «Вентилятор-поддон-теплообменник» представляет собой

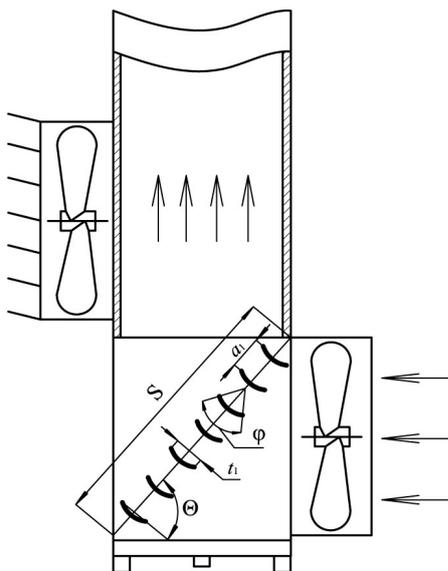


Рис. 2. Схема размещения аэродинамической решетки

Fig. 2. Mounting pattern of an aerodynamic grid

¹ Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

колено с острыми кромками ($\delta = 90^\circ$), являющееся местным сопротивлением.

Применительно к местным сопротивлениям потери давления $\Delta p_{пр}$ определяются зависимостью²:

$$\Delta p_{пр} = \xi_m \frac{\rho w_0^2}{2}, \quad (1)$$

где ξ_m – коэффициент местного сопротивления; ρ – плотность воздуха, кг/м³; w_0 – скорость воздушного потока, м/с.

В соответствии с рекомендациями² при использовании колен с острой кромкой (отсутствуют закругления на повороте), и когда сечение за поворотом больше, чем сечение перед ним, количество лопаток определяется зависимостью:

$$n_{норм} = 2,13S / t_1 - 1,$$

где t_1 – хорда лопатки (рис. 2), м; S – шаг, м.

$$S = \sqrt{b_0^2 + b_1^2},$$

где b_0 – высота канала перед поворотом (входом в поддон), м; b_1 – глубина поддона, м.

Величину хорды лопатки определяют зависимостью:

$$t_1 = (0,15 \dots 0,60b_0). \quad (2)$$

При использовании «нормального» числа лопаток их располагают вдоль линии изгиба с равномерным шагом a_i между их хордами:

$$a_i = \frac{S}{n + 1},$$

где n – число лопаток, шт.

Результаты и их обсуждение. Поскольку в воздуховодах возможно использование «нормального», минимального или сокращенного чисел лопаток, то для определения типа применяемых в составе аэродинамической решетки лопаток и целесообразности их использования выполнен расчет потерь давления потока вытяжного воздуха. Варьирование объемного расхода – от 10 до 100% всей производительности установки, составляющей 3000 м³/ч (табл. 1). Значения коэффициентов местных сопротивлений выбирались в соответствии с рекомендациями И.Е. Идельчик¹.

На основании полученных данных (табл. 1) построена поверхность распределения потерь давления в поддоне в зависимости от отсутствия или наличия аэродинамической решетки и варьирования расхода воздуха от 10 до 100% (рис. 3).

² Кожевникова Н.Г., Тогунова Н.П., Ещин А.В., Шевкун Н.А., Кривчанский В.Ф. Практикум по гидравлике: Учебное пособие. М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. 248 с.

Расчеты потерь давления воздуха в поддоне

Calculations of air pressure losses in the pan

Показатель Indicator	Без аэродинамической решетки Without an aerodynamic grid	С аэродинамической решеткой, число лопаток With an aerodynamic grid, number of blades		
		минимальное minimum	сокращенное reduced	нормальное normal
Коэффициент местного сопротивления, ξ_m Local resistance coefficient, ξ_m	0,99	0,57	0,42	0,42
Шаг, м, S/ Pitch, m, S	0,50	0,50	0,50	0,50
Скорость воздушного потока, w_p , м/с / Air flow velocity, w_p , m/s	1,7	1,7	1,7	1,7
Потери давления, $\Delta p_{пр}$, Па / Pressure loss Δp_{resist} Pa				
100%	1,72	0,99	0,73	0,73
90%	1,39	0,80	0,59	0,59
80%	1,10	0,63	0,47	0,47
70%	0,84	0,49	0,36	0,36
60%	0,62	0,36	0,26	0,26
50%	0,43	0,25	0,18	0,18
40%	0,28	0,16	0,12	0,12
30%	0,15	0,09	0,07	0,07
20%	0,07	0,04	0,03	0,03
10%	0,02	0,01	0,01	0,01

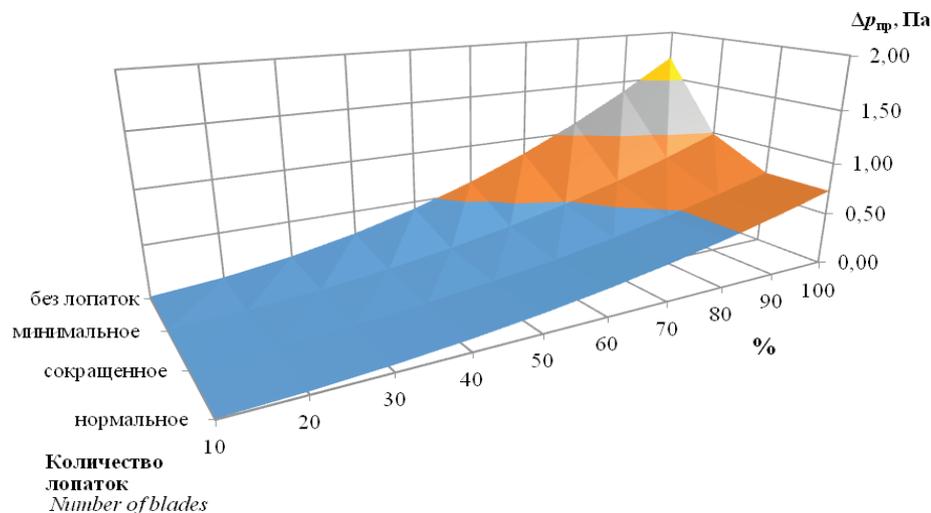


Рис. 3. Поверхность распределения потерь давления на сопротивление рециркуляционного проема

Fig. 3. Surface of pressure loss distribution on the resistance of a recirculation aperture

Анализ данных показывает, что при заданных конструктивных размерах установки и максимальной производительности вентилятора минимальные потери давления воздушного потока 0,73 Па обеспечиваются в случае, когда аэродинамическая решетка имеет сокращенное или нормальное число лопаток.

На основании известных конструктивных размеров поддона теплоутилизационной установки с учетом рекомендаций И.Е. Идельчик¹ определены геометрические параметры лопаток аэродинамической решетки и требуемое их количество (табл. 2).

Полученные результаты показывают, что число лопаток может колебаться в пределах от 5 до 21 шт. Исходя из ограниченных размерных параметров участка «Вентилятор-поддон-теплообменник» наибольший интерес представляет число лопаток в пределах от 16 до 21 шт., так как ключевым параметром оптимизации количества устанавливаемых лопаток в ограниченном пространстве будет являться величина хорды лопатки t_1 при условии получения целочисленного числа лопаток.

Для определения пространственного расположения лопаток по отношению к направлению вектора

Таблица 2

Расчеты конструктивных параметров решетки

Table 2

Calculations of the grid design parameters

Поправочный коэффициент <i>Correction factor</i>	0,15	0,2	0,25	0,30	0,35	0,4	0,5	0,5	0,55	0,60
Высота поддона, b_0 , м / <i>Pan height, b_0, m</i>	0,625									
Глубина поддона, b_1 , м / <i>Pan depth, b_1, m</i>	0,76									
Шаг, S , м / <i>Pitch, S, m</i>	0,984									
Хорда лопатки t_1 , м / <i>Chord of blade t_1, m</i>	0,094	0,125	0,156	0,188	0,219	0,250	0,281	0,313	0,344	0,375
«Нормальное» число лопаток, $n_{\text{норм}}$, шт. <i>“Normal” number of blades, $n_{\text{норм}}$, pcs.</i>	21,4	15,8	12,4	10,2	8,6	7,4	6,5	5,7	5,1	4,6
Шаг лопаток a_p , м / <i>Blade pitch a_p, m</i>	0,044	0,059	0,073	0,088	0,103	0,117	0,132	0,147	0,161	0,176

скорости набегающего воздушного потока следует учитывать, что при повороте на 90° независимо от параметров колена устанавливаются лопатки с углом дуги окружности $\varphi = 95^\circ$, угол установки лопаток к диагонали, согласно справочнику И.Е. Идельчик¹, может варьироваться в пределах $\Theta = 68 \dots 82^\circ$.

Выводы

Расчетным путем установлено, что аэродинамическая решетка с «нормальным» числом лопаток в теплоутилизационной установке УТ-3000

обеспечивает равномерное распределение воздушного потока при повороте. При этом минимальные потери давления составляют 0,73 Па, что на 58% меньше, чем в исполнении без аэродинамической решетки.

Для проведения экспериментальных исследований необходимо изготовить модель теплоутилизационной установки с аэродинамической решеткой, имеющей «нормальное» число лопаток от 16 до 21 шт., с дугой окружности лопатки 95° и углом установки лопаток к диагонали 68...82°.

Список литературы

1. Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В., Кожевникова Н.Г., Скороходов Д.М. Об особенностях организации реверсивного оттаивания в рекуператорах теплоты вытяжного воздуха // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 6. С. 15-19. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-15-19>
2. Игнаткин И.Ю., Архипцев А.В., Шевкун Н.А., Овсянникова Е.А., Шевкун В.А., Мельников О.М. Рекуперативная установка с системой корректирования направления вектора потока приточного воздуха // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2022. № 183. С. 1-11. EDN: GUVWMV.
3. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P., Shevkun N.A., Skorokhodov D.M., Serov N.V., Alipichev A.Yu., Panchenko V.A. Developing and Testing the Air Cooling System of a Combined Climate Control Unit Used in Pig Farming. *Agriculture*. 2023;13(2):334. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020334>
4. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Драный А.В., Цымбал А.А., Трубилин Е.И., Коновалов В.И. Анализ характера распределения основных параметров воздушного потока в воздуховодах // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2020. № 161. С. 282-289. EDN: DKFCEV.
5. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Шевкун В.А., Драный А.В. Экспериментальные исследования условий распыла жидкостей посредством воздушного потока // Агроинженерия. 2021. № 6 (106) С. 32-37. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-32-37>
6. Кожевникова Н.Г., Шевкун Н.А., Драный А.В., Цымбал А.А. Анализ характера распределения давления в воздушном потоке по длине воздуховода // Сборник научных трудов Седьмой Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы) СЭТТ-2020», посвященной 110-летию со дня рождения академика А.В. Лыкова. 2020. С. 282-286. EDN: NBAGMA.

References

1. Ignatkin I.Yu., Shevkun N.A., Arkhitektsev A.V., Kozhevnikova N.G., Skorokhodov D.M. On the peculiarities of organizing reverse defrosting in exhaust air heat recuperators. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2022;24(6):15-19. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2022-6-15-19>
2. Ignatkin I.Yu., Arkhitektsev A.V., Shevkun N.A., Ovsyannikova E.A., Shevkun V.A., Melnikov O.M. Recuperative installation with a system for correcting the direction of the supply air flow vector. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2022;183:1-11. (In Rus.)
3. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P., Shevkun N.A., Skorokhodov D.M., Serov N.V., Alipichev A.Yu., Panchenko V.A. Developing and testing the air cooling system of a combined climate control unit used in pig farming. *Agriculture*. 2023;13(2):334. (In Rus.) <https://doi.org/10.3390/agriculture13020334>
4. Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Dranyj A.V., Cymbal A.A., Trubilin E.I., Kononov V.I. Analysis of pattern of the main parameters of the air flow in the air ducts distribution. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2020;161:282-289. (In Rus.)
5. Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Shevkun V.A., Dranyj A.V. Experimental study of the conditions of spraying liquids with the air flow. *Agricultural Engineering*. 2021;6(106):32-37. (In Rus.) <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-6-32-37>
6. Kozhevnikova N.G., Shevkun N.A., Dranyj A.V., Tsymbal A.A. Analysing the nature of pressure distribution in the air flow along the duct length. *Sbornik nauchnykh trudov Sedmoy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyaschennoy 110-letiyu so dnya rozhdeniya Akademika A.V. Lykova*. 2020:282-286. (In Rus.)

Информация об авторах

Николай Александрович Шевкун¹, канд. с.-х. наук, доцент,
<https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>;
 Scopus Author ID: 57222576008;
energo-shevkun@rgau-msha.ru

Иван Юрьевич Игнаткин², д-р техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>;
 Scopus Author ID: 57222543815; ignatkin@rgau-msha.ru

Наталья Георгиевна Кожевникова³, канд. техн. наук, доцент;
<https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>;
energo-ngk@rgau-msha.ru

Владимир Александрович Шевкун⁴, канд. с.-х. наук;
<https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>;
vshevkun@rgau-msha.ru

Александр Владимирович Драный⁵, канд. техн. наук;
<https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>;
energo-dranyy@rgau-msha.ru

^{1,2,3,4,5} Российский государственный аграрный университет –
 МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва,
 ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Н.А. Шевкун – аналитика, методология, создание окончательной версии рукописи и ее редактирование
 И.Ю. Игнаткин – концептуализация, редактирование окончательной версии рукописи
 Н.Г. Кожевникова – создание черновика рукописи
 В.А. Шевкун – актуальность проблемы
 А.В. Драный – визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 02.08.2023, после рецензирования и доработки 12.10.2023; принята к публикации 12.10.2023

Information about the authors

Nikolay A. Shevkun¹, CSc (Ag), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0001-7451-7828>;
 Scopus Author ID: 57222576008;
energo-shevkun@rgau-msha.ru

Ivan Yu. Ignatkin², DSc (Eng), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0003-4867-1973>;
 Scopus Author ID: 57222543815; ignatkin@rgau-msha.ru

Natalya G. Kozhevnikova³, PhD (Eng), Associate Professor;
<https://orcid.org/0000-0002-3664-9456>;
energo-ngk@rgau-msha.ru

Vladimir A. Shevkun⁴, PhD (Ag);
<https://orcid.org/0000-0002-4241-9753>;
vshevkun@rgau-msha.ru

Aleksandr V. Draniy⁵, PhD (Eng);
<https://orcid.org/0000-0001-9467-4660>;
energo-dranyy@rgau-msha.ru

^{1,2,3,4,5} Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev
 Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow,
 127434, Russia

Author contribution

N.A. Shevkun – analytics, methodology, draft finalizing and editing
 I.Y. Ignatkin – conceptualisation, draft finalizing and editing
 N.G. Kozhevnikova – original draft preparation
 V.A. Shevkun – relevance of the problem
 A.V. Draniy – visualization

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper are equally responsible for plagiarism.

Received 02.08.2023; revised 12.10.2023; accepted 12.10.2023