

Тепловой баланс воздушного солнечного коллектора в системе естественной вентиляции коровника

Шкуратов Г.В., Михайличенко С.М.

Аннотация. Актуальность проблемы обусловлена необходимостью формирования требуемого микроклимата в животноводческих помещениях в условиях импортозамещения дорогих и быстро изнашиваемых шторных систем естественной вентиляции. Одним из путей совершенствования таких систем для помещений крупного рогатого скота является использование воздушных солнечных коллекторов в виде вентиляционно-отопительных панелей вместо штор. Подобная система обеспечивает не только вентиляцию животноводческого помещения, но и подогрев приточного воздуха, поступающего в него. Оценка теплотехнических характеристик воздушного солнечного коллектора с учетом переменных внешних факторов окружающей среды основана на учете температуры его тепловоспринимающей поверхности в течение суток. Эта зависимость связывает переменные внешние факторы окружающей среды с конструктивно-технологическими параметрами воздушного солнечного коллектора, что позволяет провести моделирование его теплопроизводительности в зависимости от различных внешних условий. На основании теплового баланса воздушного солнечного коллектора получено дифференциальное уравнение первого порядка в виде задачи Коши. В результате ее решения найдена зависимость температуры тепловоспринимающей поверхности воздушного солнечного коллектора от времени его работы в условиях переменных внешних факторов. При этом приняты допущения о том, что плотность потока солнечной энергии имеет квадратичную зависимость от времени суток, а температура подогретого воздуха прямо пропорциональна температуре тепловоспринимающей поверхности воздушного солнечного коллектора. Полученное выражение позволяет прогнозировать выходные теплотехнические характеристики системы естественной вентиляции.

Ключевые слова: вентиляция, помещение, коллектор, теплопроизводительность, шторы.

Для цитирования: Шкуратов Г.В., Михайличенко С.М. Тепловой баланс воздушного солнечного коллектора в системе естественной вентиляции коровника // Инновационная техника и технология. 2022. Т. 9. № 3. С. 98–104.

Thermal balance of the air solar collector in the natural ventilation system of the cowshed

Shkuratov G.V, Mikhailichenko S.M.

Abstract. The urgency of the problem is due to the need to form the required microclimate in livestock premises in the conditions of import substitution of expensive and quickly worn-out curtain systems of natural ventilation. One of the ways to improve such systems for cattle premises is the use of air solar collectors in the form of ventilation and heating panels instead of curtains. Such a system provides not only ventilation of the livestock premises, but also heating of the supply air entering it. The assessment of the thermal characteristics of an air solar collector, taking into account the variables of external environmental factors, is based on taking into account the temperature of its heat-receiving surface during the day. This dependence connects variable external environmental factors with the design and technological parameters of an air solar collector, which allows modeling its heating capacity depending on various external conditions. Based on the thermal balance of the air solar collector, a first-order differential equation in the form of the Cauchy problem is obtained. As a result of its solution, the dependence of the temperature of the heat-receiving surface of the air solar collector on the time of its operation under conditions of variable external factors is found. At the same time, assumptions are made that the density of the solar energy flow has a quadratic dependence on the time of day, and the temperature of the heated air is directly proportional to the temperature of the heat-receiving surface of the air solar collector. The resulting expression makes it possible

to predict the output thermal characteristics of the natural ventilation system.

Keywords: ventilation, room, collector, heating capacity, curtains.

For citation: Shkuratov G.V, Mikhailichenko S.M. Thermal balance of the air solar collector in the natural ventilation system of the cowshed. *Innovative Machinery and Technology [Innovatsionnaya tekhnika i tekhnologiya]*. 2022. Vol. 9. No. 3. pp. 98–104. (In Russ.).

Введение

Основным способом создания и поддержания микроклимата в помещениях крупного рогатого скота является устройство естественной вентиляции. При искусственной вентиляции как показывают расчеты коровников в условиях Сибири в зимний период до 30 % удоя (в денежном эквиваленте) необходимо отдавать на поддержание необходимого микроклимата.

Одним из вариантов обеспечения естественной вентиляции в животноводческом помещении являются шторы: скручивающиеся и складывающиеся (рис. 1). Последние технически просты, однако применяются значительно реже, так как тент при складывании переносит большие нагрузки (появление гармошки) и образующиеся складки являются привлекательным местом для грызунов. Более эффективные шторы, имеющие два привода и открывающиеся от центра стены к периферии. Однако данный вариант за счет использования двух приводов более дорогостоящий.

Так же существуют надувные шторы, но они

энергозатратны и быстро изнашиваются. Ещё одним вариантом вентиляции животноводческих помещений является использование вентиляционных жалюзи. Они могут быть изготовлены из разного материала иметь разные направления, а так же способы открывания.

Панели – еще один вариант забора воздуха через стены коровников (рис. 2). Они плотно прилегают к стене, сохраняя тепло зимой, и хорошо пропускают дневной свет, не требуя при этом таких больших проемов, как шторы.

Серьезный недостаток данных систем естественной вентиляции – попадание пыли, птиц в помещение, отсутствие контроля воздушного потока. Из практики известно, что скорость движения воздуха в помещениях для содержания скота зимой должна быть от 0,2 до 0,5 м/с [8]. Сквозняки, то есть движение воздуха с большей скоростью, вызывают переохлаждение животных в холодные периоды года. Превышение этой скорости на 1 м/с соответствует падению температуры в помещении на несколько градусов.

Конечно, отсутствия сквозняков можно добиться путем минимального открытия штор (панелей). Но тогда в этом случае вентиляция будет недостаточной и приведет к накоплению влаги и вредных газов, что также неблагоприятно влияет на здоровье и продуктивность животных.

С целью повышения эффективности естественной вентиляции, снижения экономических затрат на поддержание требуемого микроклимата на основании имеющегося опыта применения геотермальных стен зданий была предложена система естественной вентиляции коровников на основе вентиляционно-отопительных панелей, которые представляют собой ряд вертикальных воздушных солнечных коллекторов (рис. 3), установленных на наружных стенах коровника [2].

Различные периоды года требуют различных режимов вентиляции или отопления. В вентиляционно-отопительной панели предусмотрена возможность регулирования режимов вентиляции за счет различного положения поворотных заслонок: вентиляция с подачей подогретого воздуха в коровник; вентиляция с удалением избыточной влаги и теплоты из коровника; замкнутый режим обогрева.

Такие панели устанавливаются снаружи на стенах коровника и обеспечивают совместно с вытяжными шахтами или световентиляционным конь-

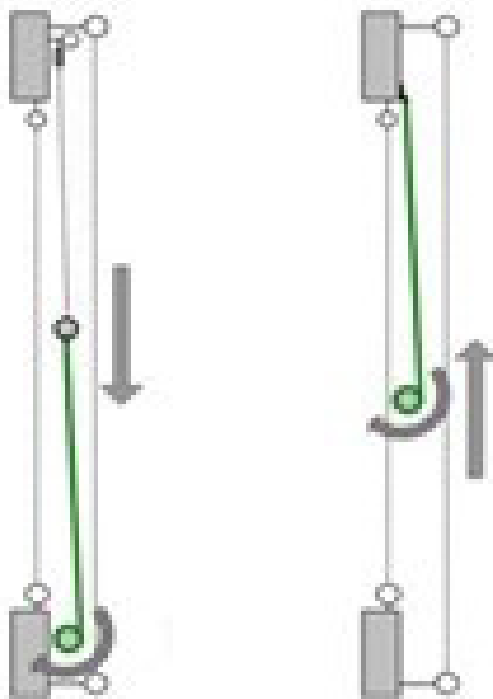


Рис. 1. Складывающиеся шторы: а – открывающиеся сверху; б – открывающиеся снизу



а)



б)

Рис. 2. Вентиляционные шторы: а – рулонные; б – подъемные

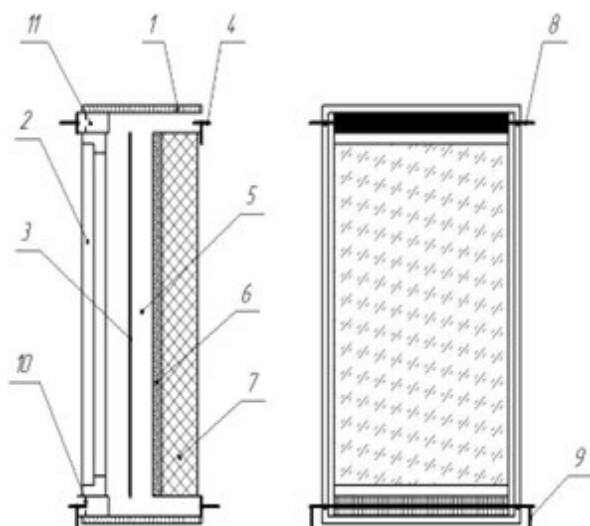


Рис. 3. Вентиляционно-отопительная панель:
 1 – рама; 2 – светопрозрачное покрытие; 3 – теплопринимающая поверхность; 4 – поворотные заслонки; 5 – внутренний воздушный канал; 6 – стенка канала; 7 – теплоизоляция; 8 – ось заслонки; 9 – рычаг заслонки; 10 – сетка; 11 – верхний канал

ком функционирование системы естественной вентиляции помещения.

Для прогнозирования теплотехнических характеристик воздушного солнечного коллектора необходимо знать изменение температуры его теплопринимающей поверхности в течение суток с учетом переменных факторов окружающей среды. Такая зависимость позволит связать параметры переменных внешних факторов с конструктивно-технологическими параметрами воздушного солнечного коллектора [7, 9].

Аналогичные задачи в последнее время решались для комбинированного теплообменника сушилки аэродинамического нагрева, включающего в себя горизонтальный воздушный солнечный коллектор [1, 3, 4, 5].

Подход к решению такой задачи для системы естественной вентиляции коровника представлен в [2]. Однако, как показала практика расчетов, принятое допущение о пропорциональности энтальпии атмосферного воздуха плотности потока солнечной энергии не корректно и приводит к большой погрешности в расчетах.

Целью работы является уточнение математической модели теплового баланса воздушного солнечного коллектора и установление на ее основе зависимости температуры теплопринимающей поверхности коллектора от переменных факторов окружающей среды. Для достижения цели необходимо принять корректные допущения в математической модели и с их учетом получить искомую зависимость.

Объекты и методы исследований

Методы

На основании [2] уравнение теплового баланса воздушного солнечного коллектора за бесконечно малый промежуток времени dt :

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ_3 + dQ_4 + dQ_5, \text{ Дж}, \quad (1)$$

где dQ_1 – количество теплоты, поступившей в коллектор с атмосферным воздухом;

dQ_2 – количество теплоты, поступившей с солнечной энергией и поглощенной теплопринимающей поверхностью;

dQ_3 – количество теплоты, отведенной подогретым атмосферным воздухом после теплообмена с теплопринимающей поверхностью;

dQ_4 – количество теплоты, идущей на нагрев теплопринимающей поверхности;

dQ_5 – потери теплоты в окружающую среду.

Аналогично количество теплоты, поступившей в коллектор с атмосферным воздухом,

$$dQ_1 = L_0 i_0(t) dt, \quad (2)$$

где L_0 – расход атмосферного воздуха, кг/с;

$i_0(t)$ – энтальпия атмосферного воздуха в зависимости от времени суток, Дж/кг.

Количество теплоты, поступившей с солнечной энергией и поглощенной тепловоспринимающей поверхностью,

$$dQ_2 = q(t) F_s \varepsilon dt, \quad (3)$$

где $q_{c,3}(t)$ – плотность потока солнечной энергии в зависимости от времени в течение суток, Вт/м²;

F_s – площадь тепловоспринимающей поверхности, м²;

ε – степень черноты поверхности.

Количество теплоты, отведенной подогретым воздухом после теплообмена с тепловоспринимающей поверхностью,

$$dQ_3 = L_0 i_1(t) dt, \quad (4)$$

где $i_1(t)$ – энтальпия подогретого воздуха в зависимости от времени суток, Дж/кг.

Количество теплоты, идущей на нагрев тепловоспринимающей поверхности,

$$dQ_4 = MCdT, \quad (5)$$

где M – масса тепловоспринимающей поверхности, кг;

C – теплоёмкость материала тепловоспринимающей поверхности, кДж/(кг·К);

dT – приращение температуры тепловоспринимающей поверхности, К.

Потери теплоты в окружающую среду

$$dQ_5 = kF (T_1(t) - T_o(t)) dt, \quad (6)$$

где k – коэффициент теплопередачи через ограждения коллектора, Вт/(м²·К);

F – площадь ограждений, м²;

$T_1(t)$ – температура подогретого воздуха в коллекторе, К;

$T_o(t)$ – температура окружающей среды в зависимости от времени суток, К.

Подставив полученные выражения (2-6) в уравнение (1), получим:

$$\begin{aligned} L_0 i_0(t) dt + q(t) F_s \varepsilon dt = \\ = L_0 i_1(t) dt + MCdT + \\ + kF (T_1(t) - T_o(t)) dt \end{aligned} \quad (7)$$

После преобразований уравнения (7) получим:

$$\left(L_0 i_0(t) + q(t) F_s \varepsilon - L_0 i_1(t) - kF (T_1(t) - T_o(t)) \right) dt = MCdT. \quad (8)$$

Требуется найти зависимость $T = f(t)$.

Результаты

Вместо некорректного допущения о пропорциональности энтальпии атмосферного воздуха плотности потока солнечной энергии, используем известную зависимость, принятую в [2] для энтальпии подогретого воздуха [10]. То есть функции $i_0(t)$ и $i_1(t)$ выражаем в виде:

$$i_0(t) = C_A T_o(t) + 0,001x (r_o + C_o T_o(t)), \quad (9)$$

$$i_1(t) = C_A T_1(t) + 0,001x (r_o + C_o T_1(t)), \quad (10)$$

где C_c – теплоемкость сухого воздуха, кДж/(кг·К);

x – влагосодержание воздуха, г/кг;

r_o – удельная теплота парообразования при температуре 0 °С;

C_o – теплоемкость пара, кДж/(кг·К).

Тогда, с учетом выражений (9) и (10) уравнение (8) будет иметь вид

$$\left(q(t) F_s \varepsilon - (T_1(t) - T_o(t)) \cdot \left(kF + L_0 (C_A + 0,001x) \right) \right) dt = MCdT. \quad (11)$$

Температура подогретого воздуха $T_1(t)$ связана с температурой тепловоспринимающей поверхности

$$T_1(t) = a_1 T(t) + b_1; \quad (12)$$

где a_1, b_1 – эмпирические коэффициенты.

Температура $T_o(t)$ очевидным образом связана с солнечной активностью. Примем, что

$$T_o(t) = a_o q(t) + b_o, \quad (13)$$

где a_o, b_o – эмпирические коэффициенты.

При этом полагаем, что

$$q(t) = at^2 + bt + c, \quad (14)$$

где a, b, c – эмпирические коэффициенты.

Тогда с учетом выражений (12-14) уравнение (11) после преобразований будет иметь вид:

$$\left((at^2 + bt + c) F_s \varepsilon - \left(a_1 T(t) + b_1 - a_o (at^2 + bt + c) - b_o \right) \cdot \left(kF + L_0 (C_A + 0,001x) \right) \right) dt = MCdT \quad (15)$$

Введем обозначения:

$$K = kF + L_0 (C_A + 0,001x C_o);$$

$$K_1 = MC;$$

$$K_2 = a (F_s \varepsilon + a_o K);$$

$$K_3 = b (F_s \varepsilon + a_o K);$$

$$K_4 = cF_s \varepsilon + (a_0 c - b_1 + b_0) K;$$

$$K_5 = a_1 K.$$

Тогда уравнение (15) примет вид:

$$(K_2 t^2 + K_3 t + K_4) dt - K_5 T_s(t) dt = K_1 dT \quad (16)$$

Итак, для определения температуры тепловоспринимающей поверхности $T(t)$ требуется решить задачу Коши:

$$\begin{cases} (K_2 t^2 + K_3 t + K_4) dt - K_5 T dt = K_1 dT \\ T(0) = T_0 \end{cases}, \quad (17)$$

где $(K_2 t^2 + K_3 t + K_4) dt - K_5 T dt = K_1 dT$ - дифференциальное уравнение первого порядка;

$T(0) = T_0$ - начальное условие;

T_0 - начальная температура тепловоспринимающей поверхности, К.

Общее решение дифференциального уравнения (17) имеет вид:

$$T = C_k e^{-\frac{K_5 t}{K_1}} + \frac{K_2}{K_5} t^2 + \left(\frac{K_3}{K_5} - 2K_1 \frac{K_2}{K_5} \right) t + \frac{K_4 - \frac{K_1}{K_5} \left(K_3 - 2K_1 \frac{K_2}{K_5} \right)}{K_5}. \quad (18)$$

Константу C_k , входящую в это решение, найдём из начального условия $T(0) = T_0$:

$$C_k = T_0 - \frac{K_4 - \frac{K_1}{K_5} \left(K_3 - 2K_1 \frac{K_2}{K_5} \right)}{K_5}. \quad (19)$$

Подставляя значение константы C_k из (19) в (18), окончательно получим:

$$T = T(t) = (T_0 - T_*) e^{-\lambda t} + At^2 + Bt + T_*, \quad (20)$$

$$\text{где } T_* = \frac{K_4 - \frac{K_1}{K_5} \left(K_3 - 2K_1 \frac{K_2}{K_5} \right)}{K_5}; \quad \lambda = \frac{K_5}{K_1};$$

$$A = \frac{K_2}{K_5}; \quad B = \left(\frac{K_3}{K_5} - 2K_1 \frac{K_2}{K_5} \right).$$

Получив искомое выражение (20), можно далее определить температуру тепловоспринимающей поверхности с учетом внешних факторов окружающей среды. Из выражения (12) далее можно будет определить температуру подогретого атмосферного воздуха, поступающего в коровник.

Обсуждение

Анализируя полученное выражение (20) и аналогичное выражение в [2] можно сделать вывод, что общая форма записи данного выражения не изменилась. Однако изменилось выражение через переменные уравнения (15) коэффициентов, входящих в уравнение (20). Корректировка сделанных допущений в исследовании позволит повысить точность расчетов температуры тепловоспринимающей поверхности с учетом факторов окружающей среды и прогнозировать выходные теплотехнические характеристики системы естественной вентиляции коровника. Аналогичный подход применительно к гелиосушительным установкам представлен в [6, 7], где показана корректность его применения для теплотехнических систем на основе воздушных солнечных коллекторов.

Выводы

В результате проведенного исследования уточнены допущения в математической модели теплового баланса воздушного солнечного коллектора в системе естественной вентиляции коровника. На основе уточненной модели получена зависимость температуры тепловоспринимающей поверхности воздушного солнечного коллектора от переменных факторов окружающей среды. Так как математическая модель включает ряд эмпирических зависимостей - выражения (12-14), то необходимо их экспериментальное определение при решении конкретных производственных задач.

Литература

- [1] Исаев, Х.М. Плодово-ягодная сушилка с комбинированным теплообменником / Х.М. Исаев, А.И. Купреенко, С.Х. Исаев // Сельский механизатор. 2020. № 1. С. 16-17. EDN: JYVENQ
- [2] Купреенко А.И. Тепловой баланс вентиляционно-отопительной панели / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, Г.В. Шкуратов. //

References

- [1] Isaev, H.M. Fruit and berry dryer with combined heat exchanger / H.M. Isaev, A.I. Kupreenko, S.H. Isaev // Rural mechanizer. 2020. No. 1. pp. 16-17. EDN: JYVENQ
- [2] Kupreenko A.I. Thermal balance of the ventilation and heating panel / A.I. Kupreenko, H.M. Isaev, G.V. Shkuratov. // VNIIMZH, No. 4 (24), 2016. From 24-27. EDN: WTRMEF

- ВНИИМЖ, № 4 (24), 2016. С 24-27. EDN: WTRMEF
- [3] Купреенко, А.И. Результаты испытания сушилки аэродинамического подогрева с комбинированным теплообменником / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.Х. Исаев // Инновации и технологический прорыв в АПК : сб. науч. тр. межд. науч.-пр. конф. Ч. 2. Брянск, 2020. С. 211-214. EDN: UJOZUJ
- [4] Купреенко, А.И. Экономическая эффективность применения комбинированного теплообменника / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, С.Х. Исаев // Состояние, проблемы и перспективы развития современной науки: сборник научных трудов национальной научно-практической конференции, 20-21 мая 2021 г. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2021. С. 162-167. EDN: AEFPEJ
- [5] Купреенко А.И., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Эффективность сушилки аэродинамического подогрева с комбинированным теплообменником // Инновационная техника и технология. 2020. № 3 (24). С. 29–36. EDN: LZDDMJ
- [6] Купреенко А.И. Определение температуры нагрева тепловоспринимающей поверхности гелиоколлектора. / Комогорцев В.Ф., Купреенко А.И., Исаев Х.М. // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2017. № 1 (16). С. 274-278. EDN: YNUJMB
- [7] Купреенко А.И., Комогорцев В.Ф., Исаев Х.М., Исаев С.Х. Тепловой баланс комбинированного теплообменника сушилки аэродинамического подогрева // Агроинженерия. 2020. № 6 (100). С. 66-73. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-66-73. EDN: GIIGVN
- [8] Курочкин, А.А. Дипломное проектирование по механизации переработки продукции животноводства. /А.А. Курочкин, В. М. Зимняков, В. В. Ляшенко и др. Учебное пособие. – Пенза: Пензенская ГСХА, 1998. 250 с. EDN: RCJTDT
- [9] Уравнение теплового баланса воздушного гелиоколлектора с аккумулятором теплоты. /А.И. Купреенко, В.Ф. Комогорцев, Х.М. Исаев, А.Н. Ченин, Г.В. Шкуратов. // Тракторы и сельхозмашины, № 4, 2016. С. 33-36. EDN: VUDQXL.
- [10] Дипломное проектирование по механизации переработки сельскохозяйственной продукции /А.А. Курочкин, И.А. Спицын, В.М. Зимняков и др. Под ред. А.А. Курочкина. М.: КолосС, 2006. – 424 с. EDN:RCJTDT.
- [3] Kupreenko, A.I. Test results of an aerodynamic heating dryer with a combined heat exchanger / A.I. Kupreenko, H.M. Isaev, S.H. Isaev // Innovations and technological breakthrough in the agro-industrial complex : collection of scientific tr. international scientific-ave. conf. Part 2. Bryansk, 2020. pp. 211-214. EDN: UJOZUJ
- [4] Kupreenko, A.I. Economic efficiency of the combined heat exchanger application / A.I. Kupreenko, H.M. Isaev, S.H. Isaev // State, problems and prospects of development of modern science: collection of scientific papers of the national scientific and practical conference, May 20-21, 2021 – Bryansk: Publishing House of the Bryansk State University, 2021. pp. 162-167. EDN: AEFPEJ
- [5] Kupreenko A.I., Isaev H.M., Isaev S.H. Efficiency of the aerodynamic heating dryer with a combined heat exchanger // Innovative technique and technology. 2020. No. 3 (24). pp. 29-36. EDN: LZDDMJ
- [6] Kupreenko A.I. Determination of the heating temperature of the heat-receiving surface of the solar collector. / Komogortsev V.F., Kupreenko A.I., Isaev H.M. // Design, use and reliability of agricultural machinery. 2017. No. 1 (16). pp. 274-278. EDN: YNUJMB
- [7] Kupreenko A.I., Komogortsev V.F., Isaev H.M., Isaev S.H. Thermal balance of the combined heat exchanger of the aerodynamic heating dryer // Agroengineering. 2020. No. 6 (100). pp. 66-73. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-5-66-73. EDN: GIIGVN
- [8] Kurochkin, A.A. Diploma design on mechanization of processing of livestock products. /A.A. Kurochkin, V. M. Zimnyakov, V. V. Lyashenko, etc. Study guide. – Penza: Penza State Agricultural Academy, 1998. 250 p. EDN: RCJTDT
- [9] The equation of the thermal balance of an air solar collector with a heat accumulator. / A.I. Kupreenko, V.F. Komogortsev, H.M. Isaev, A.N. Chenin, G.V. Shkuratov. // Tractors and agricultural machines, No. 4, 2016. pp. 33-36. EDN: VUDQXL.
- [10] Diplomnoe proektirovanie po mehanizacii pererabotki sel'skhozjajstvennoj produkcii /A.A. Kurochkin, I.A. Spicyn, V.M. Zimnjakov i dr. Pod red. A.A. Kurochkina. M.: KolosS, 2006. – 424 p. EDN: RCJTDT.

Сведения об авторах

Information about the authors

<p>Шкуратов Григорий Вячеславович заместитель директора факультета СПО ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет» 243365, обл. Брянская, р-н Выгоничский, с. Кокино, ул. Советская, д. 2А Тел.: +7(920) 865-74-75 E-mail: grigorsh696@gmail.com</p>	<p>Shkuratov Grigory Vyacheslavovich PhD in Technical Sciences deputy director «Faculty of secondary vocational education» Bryansk State Agrarian University Phone: +7(920) 865-74-75 E-mail: grigorsh696@gmail.com</p>
<p>Михайличенко Станислав Михайлович кандидат технических наук доцент кафедры «Технологического оборудования животноводства и перерабатывающих производств» ФГБОУ ВО «Брянский государственный аграрный университет» 243365, обл. Брянская, р-н Выгоничский, с. Кокино, ул. Советская, д. 2А Тел.: +7(962) 190-06-33 E-mail: S.M.Mikhailichenko@yandex.ru</p>	<p>Mikhailichenko Stanislav Mikhailovich PhD in Technical Sciences associate professor at the department of «Department of technological equipment in the livestock breeding and processing plants» Bryansk State Agrarian University Phone: +7(962) 190-06-33 E-mail: S.M.Mikhailichenko@yandex.ru</p>