ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.171
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32

Определение дальности распространения воздушной струи в струйной системе вентиляции животноводческих объектов

***И.Ю. Игнаткин*[1]✉, *М.Н. Ерохин*[2], *В.В. Кирсанов*[3]**

[1, 2] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

[3] Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

[1] ignatkin@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973

[2] n.erohin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950

[3] kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070

Аннотация. Микроклимат оказывает существенное влияние на здоровье и производительность труда персонала и на продуктивность животных. Поддержание оптимального микроклимата обеспечивается кратностью вентиляции, способом подачи и распределения приточного воздуха. В промышленных предприятиях с объемными помещениями и большим воздухообменом наиболее распространена струйная вентиляция. Для данной системы характерна проблема равномерного распределения приточного воздуха. Исследования проведены с целью оптимизации системы микроклимата за счет регулирования угла наклона потока приточного воздуха. Для обеспечения требуемых параметров микроклимата во всей зоне обслуживания предложено изменить характеристики приточных струй, используя аэродинамический насадок на выпускном отверстии приточной системы. Выяснили, что угол наклона струи приточного воздуха определяется ее температурой. Провели математическое моделирование траекторий истечения различных по характеру и температуре струй приточного воздуха. Получили зависимость текущего значения угла наклона от температуры приточного воздуха для направляющего насадка с системой динамического регулирования и критерий определения оптимального значения угла наклона для статичных аэродинамических насадков. Для отопительного периода рассчитали оптимальные углы наклона направляющих аэродинамических насадков для трех различных регионов страны. Оценку адекватности работы аэродинамических насадков провели на лабораторной установке. Результаты экспериментальных исследований подтвердили возможность и эффективность регулирования вектора потока приточного воздуха. В дальнейшем результаты исследований будут использоваться при внедрении систем обеспечения микроклимата в свиноводстве.

Ключевые слова: вентиляция; аэродинамический насадок; микроклимат; струйная вентиляция; характеристики приточных струй; температура; угол наклона струи

Для цитирования: Игнаткин И.Ю., Ерохин М.Н., Кирсанов В.В. Определение дальности распространения воздушной струи в струйной системе вентиляции животноводческих объектов // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 23-32. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32

ORIGINAL ARTICLE

Determination of an air jet propagation range in the jet ventilation system of livestock facilities

***I.Yu. Ignatkin*[1]✉, *M.N. Erokhin*[2], *V.V. Kirsanov*[3]**

[1, 2] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

[3] Federal Scientific Agroengineering Center of VIM; Moscow, Russia

[1] ignatkin@rgau-msha.ru✉; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973

[2] n.erohin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950

[3] kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070

Abstract. Indoor climate has a significant impact on health and productivity of personnel and animal performance. An optimal indoor climate depends on the ventilation rate, and the method of air supply and distribution. In industrial enterprises with spacious rooms and large air exchange, jet ventilation is the most common method, which still features uniform distribution of the supply air. The study aimed to optimize the indoor climate system by adjusting

© Игнаткин И.Ю., Ерохин М.Н., Кирсанов В.В., 2025

the inclination angle of the supply airflow. To ensure the required indoor climate parameters in the entire service area, the authors proposed to change the characteristics of the supply jets, using an aerodynamic nozzle on the outlet of the supply system. It was found out that the inclination angle of the supply air jet is determined by its temperature. The authors carried out mathematical modeling of the flow trajectories of supply air jets that were different in configuration and temperature. They obtained the relationship between the current value of the inclination angle and the supply air temperature for a guide nozzle with the dynamic control system. The criterion for determining the optimal value of the inclination angle for static aerodynamic nozzles was also determined. For the heating period, they calculated the optimal inclination angles of the aerodynamic nozzle guides for three different regions of the country. The performance adequacy of the aerodynamic nozzles was evaluated on a laboratory installation. The results of experimental studies confirmed the possibility and efficiency of regulating the supply airflow vector. The research results will be applicable to further implementation of indoor climate control systems in pig breeding facilities.

Keywords: ventilation; aerodynamic nozzle; indoor climate; jet ventilation; characteristics of supply jets; temperature; inclination angle of the jet

For citation: Ignatkin I.Yu., Erokhin M.N., Kirsanov V.V. Determination of an air jet propagation range in the jet ventilation system of livestock facilities. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2025;27(3):23-32 (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-23-32

Введение

Микроклимат оказывает существенное влияние на здоровье и производительность труда персонала, на урожайность и продуктивность сельскохозяйственных растений и животных. Требования к микроклимату на рабочих местах указаны в СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» и в отраслевых нормах технологического проектирования.

Отклонение параметров микроклимата от оптимальных значений снижает продуктивность сельскохозяйственных животных на 5…30%, продолжительность периода жизни на 5…15%, приводит к падежу молодняка до 40% [1-4].

При снижении температуры в свинарнике на 3°С себестоимость продукции за счет энергетической составляющей уменьшится на 0,18…0,63% и в то же время увеличится за счет кормовой составляющей на 4,5…6,3% [2, 5].

В промышленных животноводческих комплексах наблюдается высокая плотность содержания животных. Для поддержания оптимального микроклимата необходимо обеспечить в заданных пределах температуру, влажность, скорость движения воздушного потока, что во многом определяется кратностью вентиляции, способом подачи и распределения приточного воздуха. Кроме средних показателей микроклимата, все большее внимание уделяется равномерности обеспечения показателей в рабочей зоне.

Существуют различные системы вентиляции. В промышленных предприятиях с объемными производственными помещениями и большим воздухообменом наиболее распространена струйная система вентиляции. Удельные затраты в расчете на 1 м^3/ч вентиляционного воздуха в таких системах меньше, чем в диффузионных или вытеснительных системах, и элементная база проще, однако проблема равномерного распределения приточного воздуха проявляется более остро[1, 2] [6-9].

В отопительный период приточный воздух является более холодным и имеет более высокую плотность, чем в помещении. Чем больше разница плотности, тем выше вертикальная составляющая вектора скорости потока, что приводит к стремительному снижению высоты и дальности распространения струи приточного воздуха. В большинстве систем микроклимата современных свинарников не предусмотрен предварительный подогрев приточного воздуха. В наиболее холодный период года приточный воздух, не успевая прогреться за счет теплообмена с воздухом помещения, попадает в зону обитания животных,-при этом дальние от притока участки испытывают дефицит свежего воздуха [10-13].

Для обеспечения требуемых параметров микроклимата во всей зоне обслуживания применяются различные технические решения. Можно увеличить количество приточных элементов системы, дробя обслуживаемую зону на части, устанавливать

[1] Гулевский В.А. Микроклимат стационарных объектов птицеводства: Температурно-влажностные параметры микроклимата птицеводческих помещений с вентиляцией вакуумного типа: Монография. Саарбрюккен: LAP LAMBERT, 2012. 120 с. EDN: VNDWV

[2] Гулевский В.А., Шацкий В.П. Нормализация микроклимата птицеводческих помещений путем обработки воздуха пластинчатыми теплообменниками: Монография. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2016. 238 с. EDN: WLXOIV

разгонные или потолочные вентиляторы [14-16] или изменить характеристики приточных струй (скорость, направление или характер истечения) с помощью аэродинамических насадков, располагаемых на выпускных отверстиях приточных систем.

Цель исследований: оптимизировать систему микроклимата за счет регулирования угла наклона потока приточного воздуха.

Материалы и методы

Провели анализ и математическое моделирование траекторий истечения различных по характеру и температуре струй приточного воздуха. Анализ истечения неизотермических струй показал, что охлажденные струи под действием силы тяжести опускаются вниз, и с ростом разности температур этот процесс ускоряется (рис. 1).

Помимо характера струи, на траекторию ее движения влияет соотношение гравитационных и инерционных сил, определяемое текущим критерием Архимеда:

$$Ar_x = \frac{g \cdot x \cdot \Delta t_x}{V_x^2 \cdot T_{\text{окр}}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{окр}}$ – абсолютная температура окружающей среды, К; x – расстояние до рассматриваемого сечения, м; V_x – осевая скорость в рассматриваемом сечении, м/с; $\Delta t_x = t_{вн} - t_{нар}$ – температурный напор в рассматриваемом сечении, °С; $t_{вн}$ – внутренняя температура, °С; $t_{нар}$ – наружная температура, °С; g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Вертикальное отклонение оси неизотермической струи вычисляется по формуле:

$$y = x \cdot Ar_x \cdot k, \quad (2)$$

где k – эмпирический коэффициент, для осесимметричных струй равный 0,6.

Распределение скоростей и температур определяется по формуле Г. Рейхардта:

$$v = v_m \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{y}{C \cdot x}\right)^2}, \quad (3)$$

где v_m – осевая скорость, м/с; C – эмпирическая постоянная с вероятностным значением 0,082; x – расстояние до рассматриваемого сечения, м; y – вертикальное отклонение траектории, м.

Скорость снижения приточного воздуха определяется соотношением разности плотностей и квадрата осевой скорости (формула 1). При постоянстве начальной скорости потока и температуры в помещении переменной остается температура приточного воздуха.

Таким образом, при определении угла наклона струи приточного воздуха определяющим фактором является ее температура.

Результаты и их обсуждение

Расчетные осевые траектории движения охлажденных струй (закрученной, спрямленной и направленной системой параллельных жалюзи) приведены на рисунке 2. Например, при температурном напоре 10°С, диаметре выпускного отверстия 0,8 м и начальной скорости свободной закрученной струи 3,3 м/с максимальная дальность ее распространения составляет 12,6 м, и на излете осевая линия опускается на 4,9 м, а при –40°С – почти на 29 м, что в реальных условиях практически недостижимо.

Плотность воздуха изотермических струй равна плотности воздуха помещения. Такие потоки распространяются вдоль оси выпускного отверстия, и их дальность истечения максимальна. Охлажденные струи являются более плотными и под действием силы тяжести приобретают вертикальную составляющую перемещения. По мере снижения

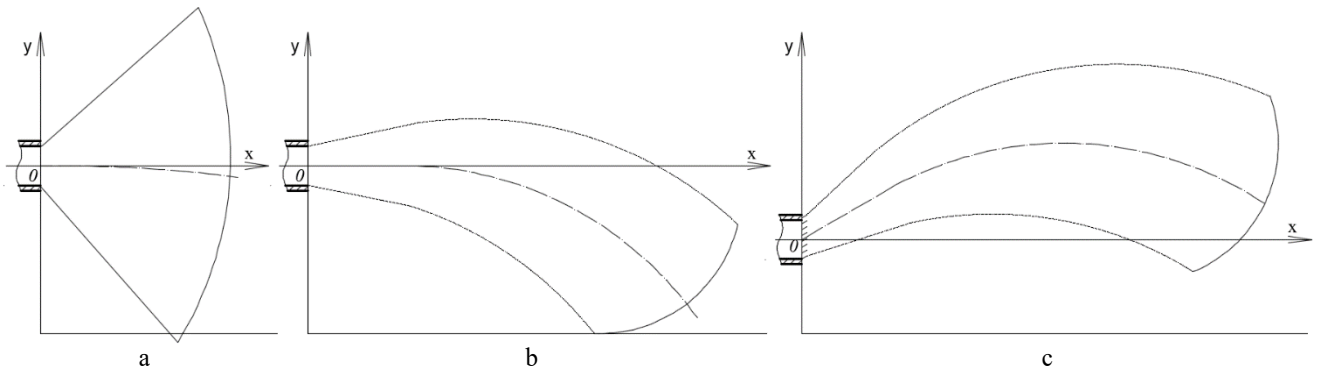

Рис. 1. Охлажденные струи:
a – закрученная; b – спрямленная с выходом из цилиндрического отверстия;
c – направленная, с выходом из насадка в – виде системы параллельных жалюзи

Fig. 1. Cooled jets:
a – swirled; b – straightened, with an outlet from a cylindrical hole;
c – directional, with an outlet from a nozzle in the form of a system of parallel shutters

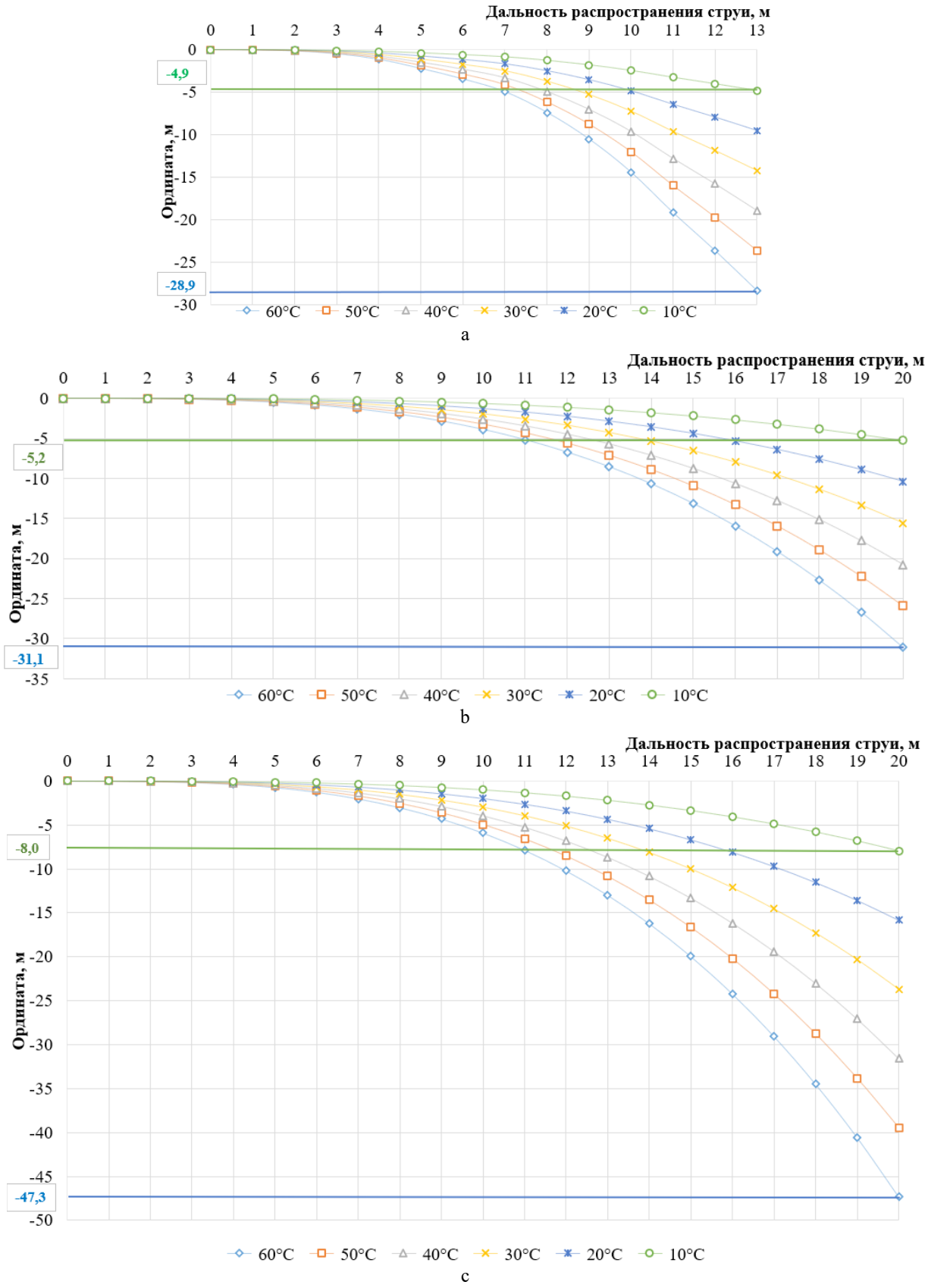

Рис. 2. Траектории истечения охлажденных свободных струй из различных насадков:
a – закрученная; b – спрямленная с выходом из цилиндрической трубы;
c – спрямленная и направленная системой параллельных жалюзи

Fig. 2. Trajectories of the outflow of cooled free jets from various nozzles:
a – swirled; b –straightened with an outlet from a cylindrical pipe;
c – straightened and directed by a system of parallel shutters

поток опускается в рабочую зону, и его дальнейшее распространение вдоль основного направления затрудняется при наличии препятствий: перегородок, мебели, оборудования. Следовательно, в качестве лимитирующего параметра, определяющего необходимость коррекции направления потока, нужно учитывать допускаемое вертикальное перемещение y_{min} (рис. 3). Увеличить дальность истечения охлажденных струй в условиях производства можно за счет направления потока вверх под углом к горизонту α.

В случае применения направляющих насадков важно определить методику выбора оптимального угла наклона. Очевидно, что дальность распространения струи с увеличением угла наклона будет равна проекции на горизонтальную ось. Устанавливать угол выше 45° не имеет смысла. Учитывая формулу 2 и данные рисунка 3, текущее значение угла коррекции потока α можно найти по формуле:

$$\alpha = arctg\left(\frac{x_{max} \cdot Ar_x \cdot k}{x_{max}}\right) = arctg\,(Ar_x \cdot k). \qquad (4)$$

В случае использования статичного направляющего насадка встает вопрос о критерии оптимизации угла наклона.

Очевидным решением представляется настройка системы на угол, соответствующий температуре с наибольшей длительностью стояния в течение отопительного периода.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 6 мая 2011 г. № 354 отопительный период начинается на следующий день после пятидневки со среднесуточной температурой наружного воздуха ниже 8°С. Для Москвы температурный диапазон отопительного периода составляет 38°С (СП 131.13330.2020 «Строительная климатология»). Оценивая температурный спектр в течение отопительного периода (рис. 4), видим, что наибольшая длительность стояния приходится на 0°С, то есть температуру фазовых превращений воды, и обусловлена большим значением теплоты льдообразования.

Настраивать систему подачи воздуха на углы, соответствующие 0°С, нельзя, так как важна не столько длительность, сколько энергия теплового воздействия на конкретный объект. Энергия конвективного теплообмена определяется по формуле:

$$Q = F \cdot \Delta t \cdot \alpha \cdot \tau, \qquad (5)$$

где F – площадь поверхности теплообмена, м^2; Δt – температурный напор, °С; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·°С); τ – продолжительность процесса, с.

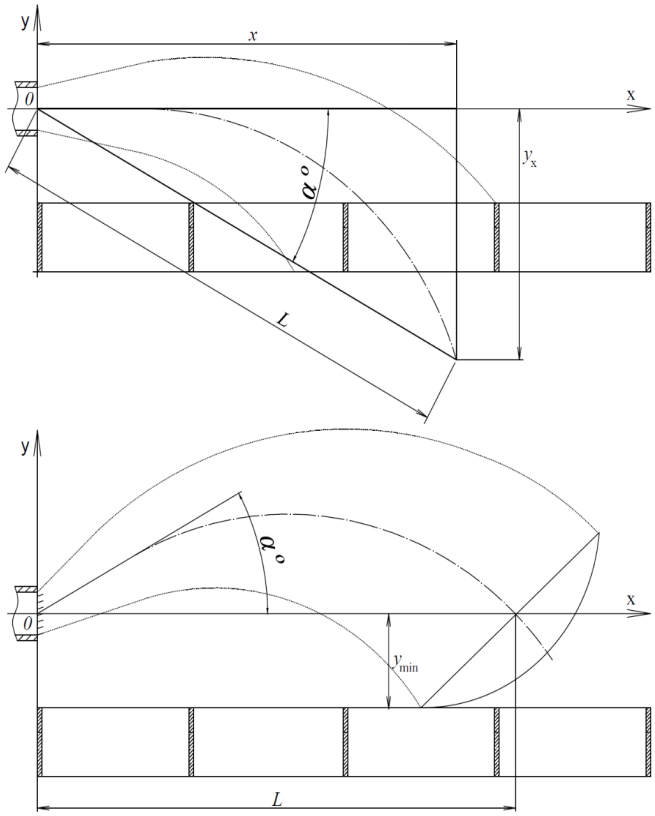

Рис. 3. Истечения охлажденных свободных струй

Fig. 3. Outflow of cooled free jets

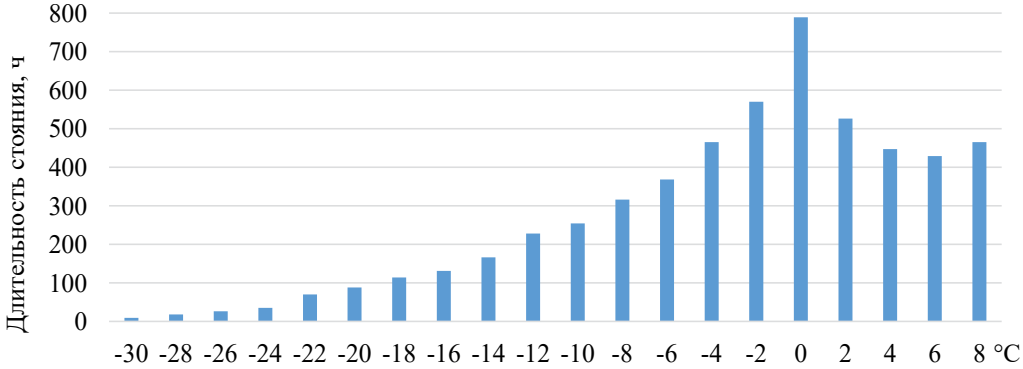

Рис. 4. Спектр температур отопительного периода Москвы

Fig. 4. Temperature range of the heating period in Moscow

При постоянной скорости движения воздуха для конкретного животного пкараметры F и α являются постоянными и энергия теплообмена определяется произведением $\Delta t \cdot \tau$ по аналогии с методикой расчета тепловой защиты зданий. Поэтому насадок подачи приточного воздуха с фиксированным углом наклона следует устанавливать таким образом, чтобы наклон потока обеспечивал максимальную дальность распространения воздушного потока температурой, соответствующей значению температурной координаты центра тяжести фигуры под кривой ($\Delta t \cdot \tau$) отопительного периода. При этом площадь нужно учитывать в рабочем интервале: от наиболее холодной температуры отопительного периода (t_{min}) до температуры начала/конца регулирования угла наклона (t_{α}), представленной на рисунке 5 и отмеченной красной чертой.

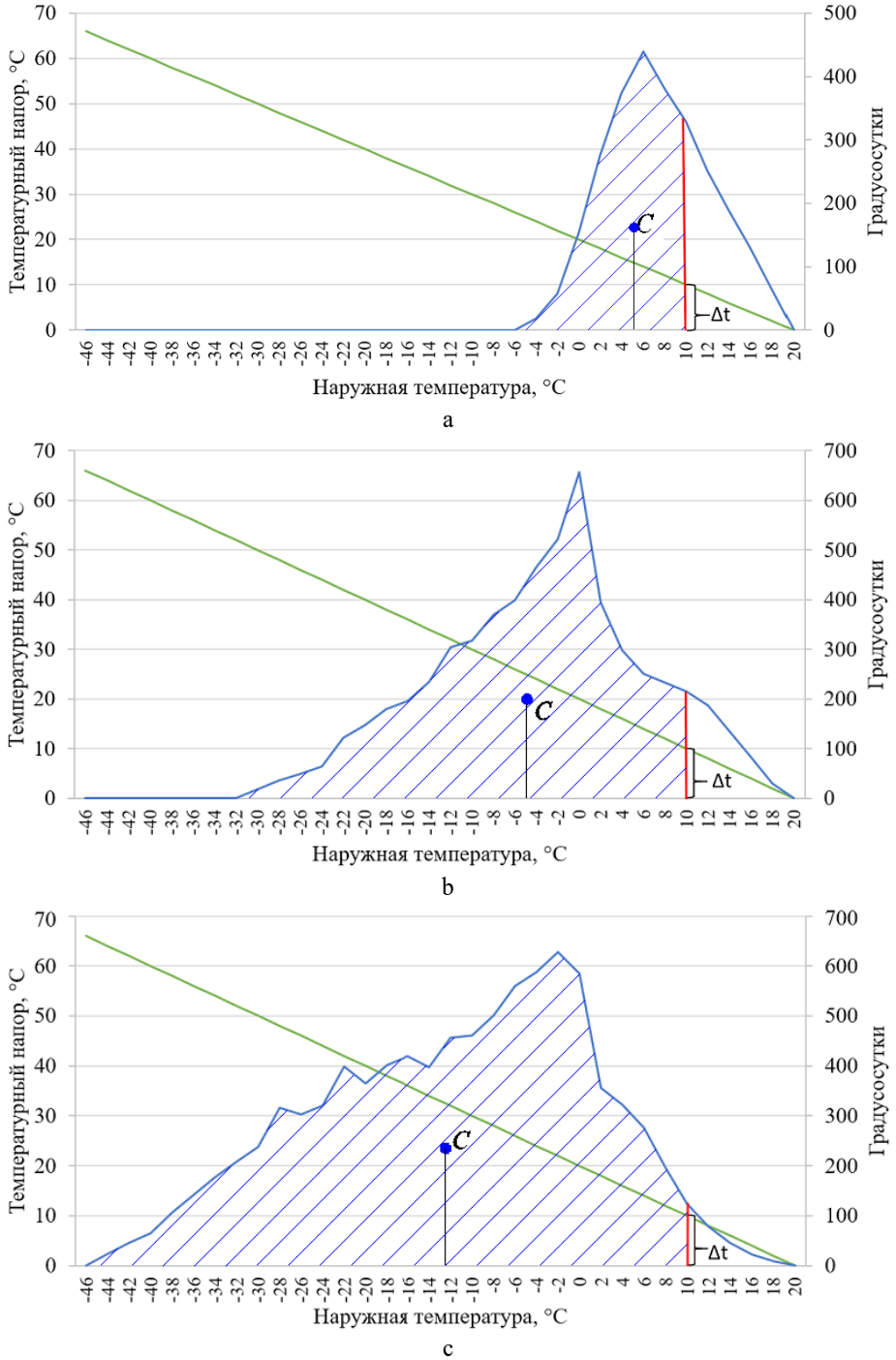

Рис. 5. График длительности стояния температур в различных регионах страны:
a) Сочи; b) Москва; c) Нарьян-Мар

Fig. 5. Temperature duration chart for:
a) Sochi; b) Moscow; c) Naryan-Mar

Температурную координату центра тяжести фигуры под кривой ($\Delta t \cdot \tau$) можно вычислить по формуле:

$$t_C = t_\alpha - \frac{\sum_{i=t_\alpha}^{t_{min}} |t_i \cdot \tau_i| \Delta t_i}{\sum_{i=t_\alpha}^{t_{min}} |t_i \cdot \tau_i|}, \quad (6)$$

где t_α – температура начала/конца регулирования направления потока; t_{min} наиболее холодная температура отопительного периода, °С; t_C – температурная координата центра тяжести фигуры под графиком $\sum_{i=t_\alpha}^{t_{min}} t_i \cdot \tau_i$, °С; t_i – i-я температура, °С; τ_i – длительность стояния i-й температуры в течение отопительного периода, сут.

Согласно графикам, приведенным на рисунке 5, для Сочи необходимо настраивать статичные направляющие системы на угол, соответствующий температуре 5,3°С, для Москвы – минус 5,5°С, а для Нарьян-Мара – минус 12,5°С. В качестве примера приведены значения оптимальных углов наклона направляющих насадков для Сочи, Москвы и Нарьян-Мара (рис. 6).

Оценку адекватности работы аэродинамических насадков удобно исследовать при фото- и видеофиксации потока воздуха, окрашенного паром смеси глицерина и пропиленгликоля. Нами изготовлена лабораторная установка, позволяющая регулировать скорость потока воздуха и устанавливать аэродинамические насадки на выпускном отверстии. На контрастном экране нанесена измерительная сетка с шагом 100 мм, что соответствует диаметру (калибру) выпускного отверстия. Результаты испытаний представлены на рисунке 7. Размеры на рисунке приведены в калибрах (известна разница температур Δt, поэтому значение скорости v не указано).

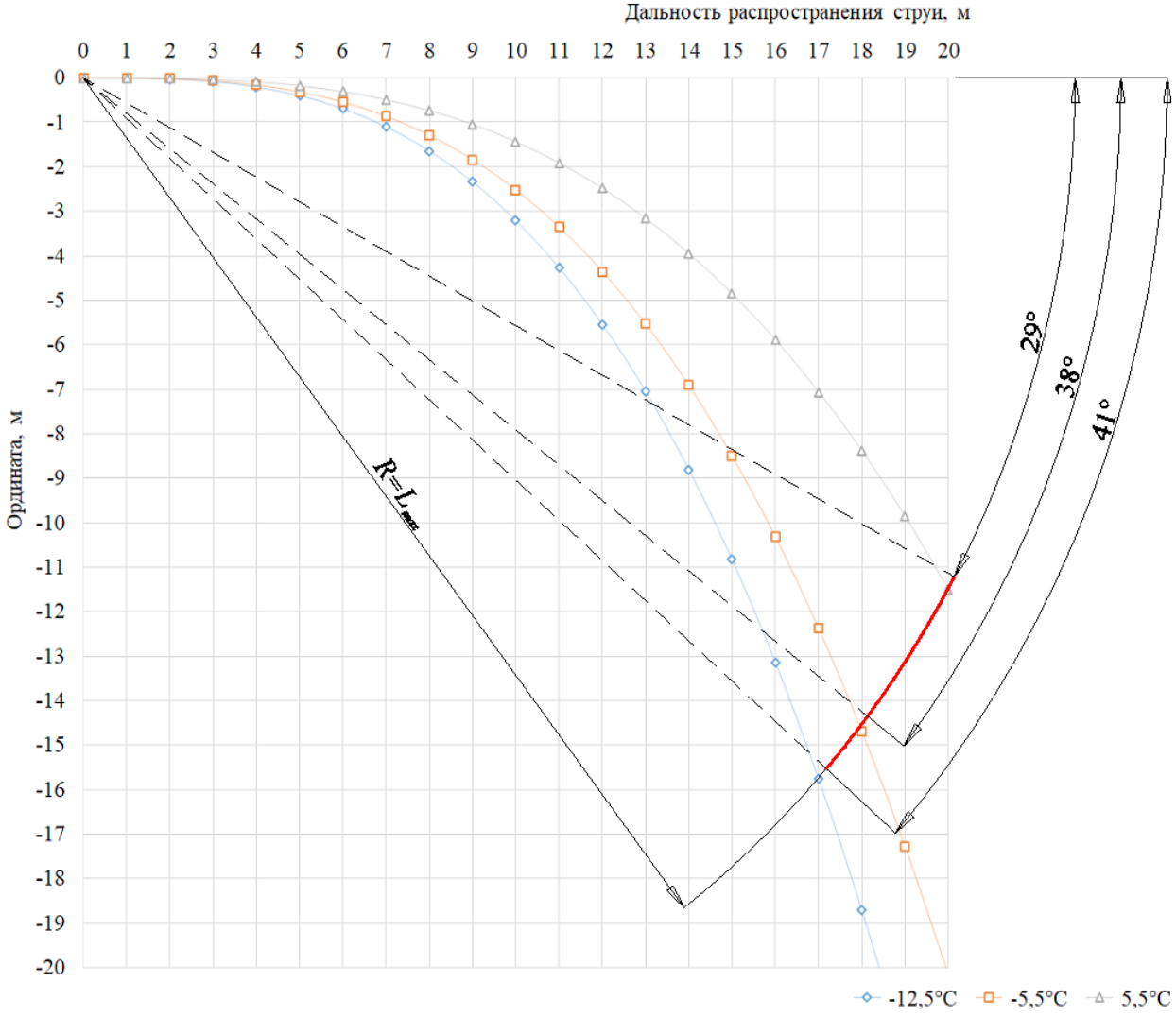

Рис. 6. Схема к обоснованию оптимальных углов наклона направляющих аэродинамических насадков для Сочи, Москвы и Нарьян-Мара

Fig. 6. Diagram for justifying the optimal inclination angles of the aerodynamic nozzle guides for Sochi, Moscow and Naryan-Mar

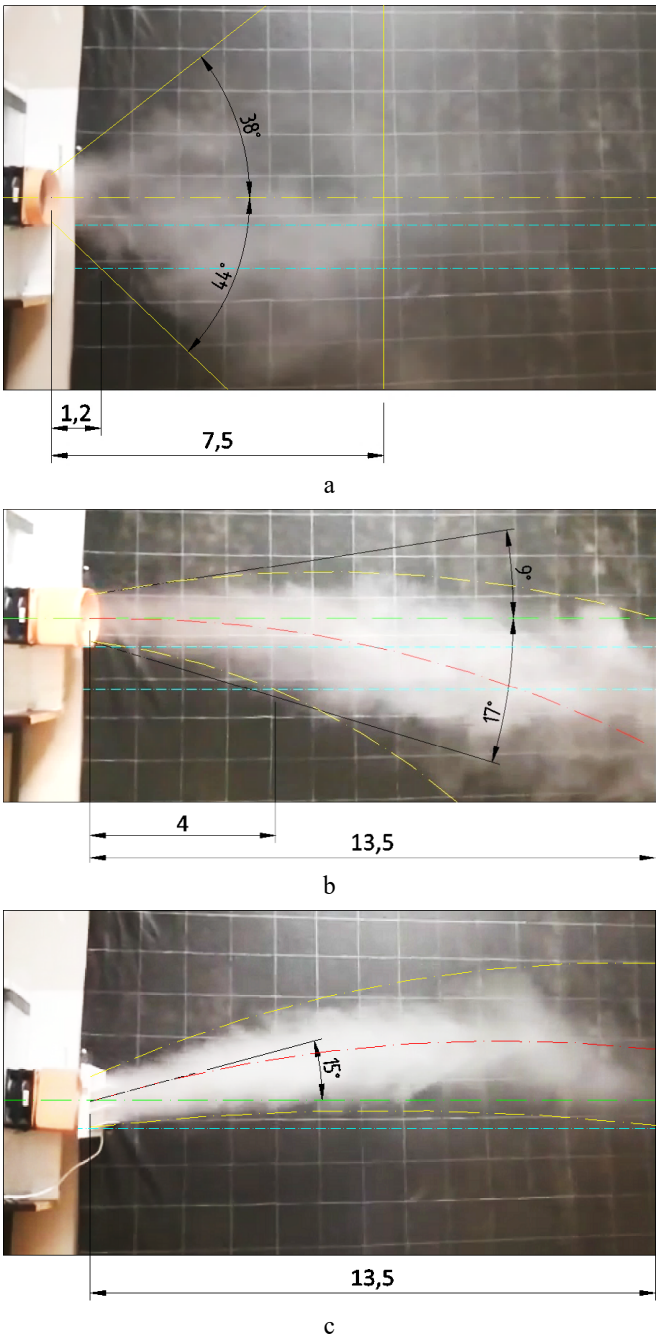

Рис. 7. Охлажденные воздушные струи (Δt = 10°С):
a – закрученная; b – спрямленная;
c – спрямленная направленная под углом 15° к горизонту

Fig. 7. Cooled air jets (Δt = 10°C):
a – swirled; b – straightened;
c – straightened directed at an angle of 15° to the horizon

Закрученная струя имеет почти прямой угол при вершине конуса (82°) и соответственно минимальную дальность распространения 7…7,5 калибров, далее струя гаснет, и имеет место только диффузионный воздухообмен. Нижняя граница струи опускается на один калибр, переместившись вдоль осевого направления на 1,2 калибра.

Спрямленная струя имеет угол при вершине конуса 25…26°, дальность распространения превышает 14 калибров, однако переместившись на 4 калибра вдоль горизонтальной оси, она опустилась на один калибр. В свою очередь, направленная под углом 15° к горизонту вверх, струя преодолела расстояние 13,5 калибра, достигнув исходной высоты; дальность распространения превышает 14 калибров.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что системы регулирования направления вектора потока воздуха могут эффективно управлять траекторией движения воздуха и обеспечить желаемую дальность истечения струи приточного воздуха.

Выводы

1. При проектировании и эксплуатации струйных систем вентиляции необходимо учитывать параметры истечения струй приточного воздуха.

2. Для регулирования дальности распространения неизотермических струй следует применять угловую коррекцию направления вектора потока согласно зависимости $\alpha = arctg(Ar_x \cdot k)$.

3. Устанавливать статичные направляющие аэродинамических насадков следует под углом наклона, соответствующим значению температурной координаты центра тяжести фигуры под кривой ($\Delta t \cdot \tau$) отопительного периода. При этом площадь нужно учитывать в рабочем интервале: от наиболее холодной температуры отопительного периода (t_{min}) до температуры начала/конца регулирования угла наклона (t_α). Например, для Сочи это значение составляет 5,3°С (угол 29°), для Москвы – минус 5,0°С (угол 38°), для Нарьян-Мара – минус 12,5°С (угол 41°).

4. Результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность и эффективность регулирования вектора потока приточного воздуха.

Список источников

1. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P., Shevkun N.A. et al. 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

2. Ильин И.В., Игнаткин И.Ю., Курячий М.Г. Влияние параметров микроклимата на продуктивность свиней // Эффективное животноводство. 2011. № 5 (67). С. 30-31. EDN: OKRQPR

3. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Хименко А.В. Энергосберегающая система отопления с применением электрических

References

1. Ignatkin I.Yu., Kazantsev S.P., Shevkun N.A. et al. 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

2. Ignatkin I.Yu., Kuryachiy M.G. Ventilation systems and effect climate parameters on the productivity of pigs. *Bulletin NGIEI*. 2012;10(17):16-34. (In Russ.)

3. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Khimenko A.V. Energy-saving heating system using electric heat accumulators and ceiling

тепловых аккумуляторов и потолочных вентиляторов // Техника и оборудование для села. 2022. № 2 (296). С. 34-38. EDN: LWUAFU

4. Самарин В.А., Самарин Г.Н. Теоретические основы энергосберегающей технологии формирования микроклимата в животноводческих помещениях // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2010. № 5. С. 36-38. EDN: MWLXFB

5. Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. et al. Local heating through the application of a thermoelectric heat pump for prenursery pigs. Agriculture. 2023;13(5):948. https://doi.org/10.3390/agriculture13050948

6. Самарин Г.Н. Влияние параметров микроклимата на продуктивность кур-несушек // Птица и птицепродукты. 2007. № 2. С. 37-38. EDN: NAZAYH

7. Petrakis T., Kavga A., Thomopoulos V., Argiriou A.A. Neural network model for greenhouse microclimate predictions. Emerging Agricultural Engineering Sciences, Technologies and Applications. Agriculture 2022;12(6):780. https://doi.org/10.3390/agriculture12060780

8. Cai J., Ding F., Hong Y., Hu R. An impact analysis of farmer field schools on hog productivity: Evidence from China. Agricultural Policy, Food Security, and Rural Development: Innovations and Perspectives. Agriculture. 2021;11(10):972. https://doi.org/10.3390/agriculture11100972

9. Шацкий В.П., Гулевский В.А., Спирина Н.Г. Применение теплообменников (рекуператоров) для нормализации микроклимата животноводческих помещений // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013. № 9 (657). С. 64-68. EDN: QCHMIH

10. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Струйная модель притока вентиляционного воздуха из теплоутилизационной установки // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 2 (84). С. 28-32. EDN: YWRDIO

11. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Оценка характера распределения приточного воздуха в условиях струйных течений // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2018. № 3 (85). С. 35-41. EDN: USPOHJ

12. Кузьмичев А.В., Тихомиров Д.А., Трунов С.С. Тепловые завесы в системах микроклимата животноводческих ферм // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2019. № 1 (34). С. 14-20. EDN: MMDITR

13. Тихомиров Д.А. Вентиляционно-отопительная установка модульного типа // Сельский механизатор. 2012. № 9. С. 32-33. EDN: PDEEGH

14. Кузьмичев А.В., Тихомиров А.В., Хименко Д.А. Выбор потолочных вентиляторов в системе микроклимата животноводческих помещений // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2025. Т. 19, № 1. С. 69-76. https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76

15. Тихомиров Д.А., Добровольский Ю.Н., Баклачян Р.А. Функциональная схема интеллектуальной системы управления микроклиматом в животноводческом помещении // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, зоотехнии, биотехнологии и экспертизы сырья и продуктов животного происхождения: Сборник трудов 3-й научно-практической конференции, Москва, 28 июня 2024 г. М.: Издательство «Сельскохозяйственные технологии», 2024. С. 392-393. EDN: RGYWJR

fans. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;2:34-38. https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-2-34-38 (In Russ.)

4. Samarin V.A. Theoretical foundations of energy-saving technology of indoor climate formation in livestock buildings. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2010;5:36-38. (In Russ.)

5. Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. et al. Local heating through the application of a thermoelectric heat pump for prenursery pigs. *Agriculture*. 2023;13(5):948. https://doi.org/10.3390/agriculture13050948

6. Samarin G.N. Effect of indoor climate parameters on the productivity of laying hens. *Poultry & Chicken products*. 2007;2:37-38. (In Russ.)

7. Petrakis T., Kavga A., Thomopoulos V., Argiriou A.A. Neural network model for greenhouse microclimate predictions. Emerging Agricultural Engineering Sciences, Technologies, and Applications. *Agriculture*. 2022;12(6):780. https://doi.org/10.3390/agriculture12060780

8. Cai J., Ding F., Hong Y., Hu R. An impact analysis of farmer field schools on hog productivity: Evidence from China. Agricultural Policy, Food Security, and Rural Development: Innovations and Perspectives. Agriculture. 2021;11(10):972. https://doi.org/10.3390/agriculture11100972

9. Shatsky V.P., Gulevsky V.A., Spirina N.G. Application of heat exchangers (recuperators) for the normalization of cattle shed microclimate *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2013;9:64-68. (In Russ.)

10. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Jet model of ventilation air inflow from heat-recovery unit. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018;2:28-32. (In Russ.)

11. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Estimating the distribution pattern of the supply air in jet flow conditions. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*. 2018;3:35-41. (In Russ.)

12. Kuz'michev A.V., Tikhomirov D.A., Trunov S.S. Heat air curtains in microclimate systems for livestock farms. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture.* 2019;1:14-20. (In Russ.)

13. Tihomirov D.A. The ventilation and heating system is modular. *Selskiy Mekhanizator.* 2012;9:32-33. (In Russ.)

14. Kuzmichev A.V., Tikhomirov D.A., Khimenko A.V. Selection of ceiling fans for the microclimate system of livestock facilities. *Agricultural Machinery and Technologies*. 2025;19(1):69-76. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/2073-7599-2025-19-1-69-76

15. Tikhomirov D.A., Dobrovolskiy Yu.N., Baklachyan R.A. Functional scheme of the intelligent system of microclimate control in the livestock room. Topical problems of veterinary medicine, zootechny, biotechnology and evaluation of raw materials and products of animal origin: Proceedings of the 3rd Scientific and Practical Conference, Moscow, June 28, 2024. M.: LLC "Publishing House 'Selskokhozyaystvvennye Tekhnologii'", 2024. P. 392-393.

16. Tikhomirov D.A., Dobrovolskiy Yu.N., Baklachyan R.A. Application of ceiling fans in the system of providing indoor climate in livestock buildings. Topical problems of veterinary medicine, zootechny, biotechnology and evaluation of raw materials and products of animal origin: Proceedings of the 2nd Scientific and Practical Conference, Moscow, June 23, 2023. M.: Selskokhozyaystvvennye Tekhnologii, 2023. P. 360-361

16. Тихомиров Д.А., Добровольский Ю.Н., Баклачян Р.А. Применение потолочных вентиляторов в системе обеспечения микроклимата в животноводческих помещениях // Актуальные проблемы ветеринарной медицины, зоотехнии, биотехнологии и экспертизы сырья и продуктов животного происхождения: Сборник трудов 2-й научно-практической конференции, Москва, 23 июня 2023 г. М.: Издательство «Сельскохозяйственные технологии», 2023. С. 360-361. EDN: HYLINX

Информация об авторах

[1] **Игнаткин Иван Юрьевич,** д-р техн. наук, профессор; ignatkin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 4391-8002, AuthorID: 769663; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973
[2] **ЕрохинМихаил Никитьевич,** академик РАН, д-р техн. наук, профессор; n.erohin@rgau-msha.ru; SPIN-код: 3499-4405, AuthorID: 626708; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950;
[3] **Кирсанов Владимир Вячеславович,** член-корреспондент РАН; д-р техн. наук, профессор, kirvv2014@mail.ru; SPIN-код: 3983-5253, AuthorID: 342616; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070;
[1, 2] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49
[3] Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Author Information

Ivan Yu. Ignatkin [1], DSc (Eng), Professor; ignatkin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973; Scopus Author ID: 57222543815; Researcher ID: AAC-1577-2022
Mikhail N. Erokhin [2], Full Member of the Russian Academy of Sciences, DSc (Eng), Professor; n.erohin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-6573-0950, Scopus Author ID: 572092705884
Vladimir V. Kirsanov [3], Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, DSc(Eng), Professor; kirvv2014@mail.ru; https://orcid.org/0000-0003-2549-4070
[1,2] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127434, Russian Federation, Moscow, Timiryazevskaya Str., 49
[3] Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Вклад авторов

И.Ю. Игнаткин – обоснование актуальности проблемы, формулирование основной концепции исследований, подготовка рукописи и ее графическое оформление;
М.Н. Ерохин – разработка методологии исследований;
В.В. Кирсанов – руководство исследованиями, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за плагиат

Статья поступила 12.03.2025; после рецензирования и доработки 25.04.2025; принята к публикации 28.04.2025

Author Contribution

I.Yu. Ignatkin – problem relevance statement, conceptualization, writing – original draft, visualization;
M.N. Erokhin – methodology;
V.V. Kirsanov – research supervision, writing – review and editing of the manuscript.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article and bear equal responsibility for plagiarism

Received 12.03.2025; Revised 25.04.2025; Accepted 28.04.2025