ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 631.22.01
https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-70-78

Повышение аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора

***И.Ю. Игнаткин*[1]✉, *М.М. Прокофьев*[2], *Н.А. Шевкун*[3], *С.В. Золотарев*[4]**

[1, 2, 3, 4] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

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

[2] m.prokofiev@rgau-msha.ru

[3] energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828

[4] zolotarev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3615-6130

Аннотация. Оптимизация микроклимата способствует улучшению физиологического состояния свиней и повышению их продуктивности. Водоиспарительные системы свиноводческих комплексов нуждаются в модернизации. С целью повышения аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора за счет равномерного распределения воздуха по поверхности охлаждающих кассет предложили использовать спрямляющий аппарат и систему дефлекторов. Прогнозируемый прирост производительности установки с дефлекторами составил 2%. Экспериментально полученные средние значения скорости потока подтвердили повышение производительности оптимизированной конструкции охладителя (с дефлекторами) в сравнении с исходной в 1,02 раза. Установлена положительная динамика выравнивания поля скоростей при установке трех дефлекторов и спрямляющего аппарата. Сравнительный анализ показал снижение потерь давления модульного охладителя с дефлекторами на 4% в сравнении с установкой без дефлектора. Применение спрямляющего аппарата и трех дефлекторов обеспечило прирост средней скорости потока воздуха и привело к увеличению повышению производительности установки на 289 м^3/ч. Оптимизация аэродинамических параметров установки обеспечила снижение коэффициента вариации скорости воздушного потока на 28,6%, что гарантирует на 90% площади охлаждающих кассет скорость движения воздуха с отклонением, не превышающим 20% от среднего значения. Разработанный модернизированный модульный охладитель-дезинфектор рекомендуем применять в свиноводческих комплексах для оптимизации микроклимата.

Ключевые слова: водоиспарительные системы; микроклимат; модульный охладитель-дезинфектор; повышение аэродинамической эффективности; расход воздуха; свиноводство; спрямляющий аппарат; дефлектор

Для цитирования: Игнаткин И.Ю., Прокофьев М.М., Шевкун Н.А., Золотарев С.В. Повышение аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 5. С. 70-78. https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-70-78

ORIGINAL ARTICLE

Method for increasing the aerodynamic efficiency of a modular cooler-disinfector

***I.Y. Ignatkin*[1], *M.M. Prokofiev*[2], *N.A. Shevkun*[3], *S.V. Zolotarev*[4]**

[1, 2, 3, 4] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

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

[2] m.prokofiev@rgau-msha.ru

[3] energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828

[4] zolotarev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3615-6130

Abstract. Microclimate optimization is crucial for enhancing the physiological well-being and productivity of pigs. However, conventional evaporative cooling systems in swine-breeding facilities often suffer from aerodynamic inefficiencies that demand technological modernization. The study proposes the integration of a flow straightener and an optimized deflector system to improve the aerodynamic efficiency of a modular cooler-disinfector by ensuring uniform air distribution across the cooling cassettes. Numerical simulations predicted a 2% increase in unit performance with the proposed deflectors, which was subsequently validated experimentally by an identical

© Игнаткин И.Ю., Прокофьев М.М., Шевкун Н.А., Золотарев С.В., 2026

performance improvement factor of 1.02 relative to the baseline design. Incorporating three deflectors and a flow straightener equalized the velocity field, resulting in a 4% reduction in aerodynamic pressure losses compared to the installation without deflectors. Furthermore, this optimized configuration enhanced the average air flow velocity, boosting the overall volumetric capacity of the unit by 289 m^3/h. Aerodynamic optimization achieved a 28.6% reduction in the coefficient of variation of the air flow velocity, ensuring that local air velocity deviates by no more than 20% from the mean value across over 90% of the cooling cassette surface area. The developed modernized modular cooler-disinfector is recommended for implementation in swine-breeding facilities to optimize microclimate conditions and energy performance.

Keywords: water-evaporative cooling systems; microclimate; modular cooler-disinfector; aerodynamic efficiency; airflow distribution; swine production; flow straightener; deflector

For citation: Ignatkin I.Y., Prokofiev M.M., Shevkun N.A., Zolotarev S.V. Method for increasing the aerodynamic efficiency of a modular cooler-disinfector. *Agricultural Engineering* (*Moscow*). 2026;28(5):70-78. (In Russ.). https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-5-70-78

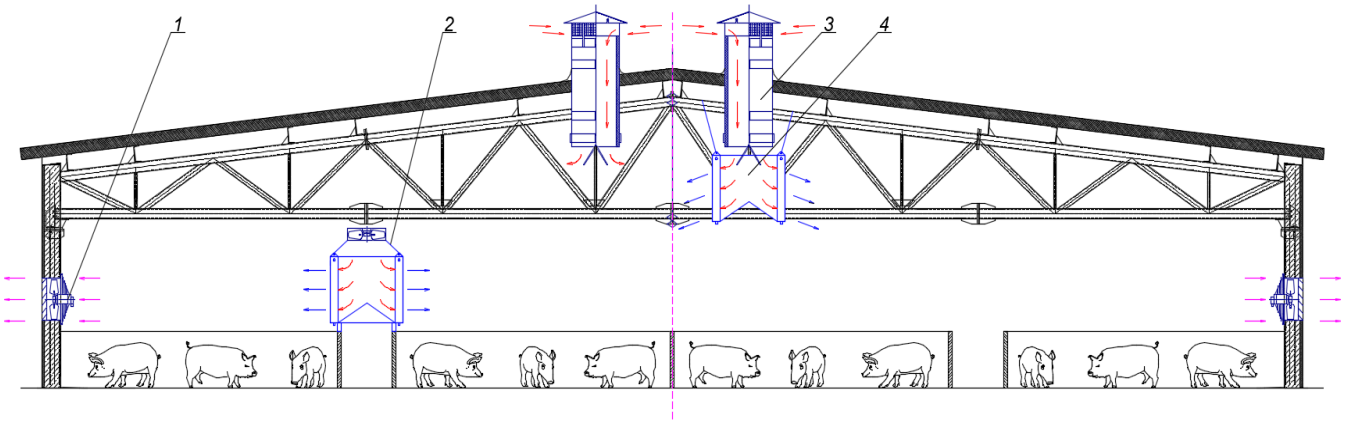
Введение

Оптимизация микроклимата является фундаментальным технологическим аспектом интенсивного животноводства, влияющим на физиологическое состояние свиней и уровень реализации их генетического потенциала [1-3]. Эффективная система микроклимата обеспечивает стабильность температурного и влажностного режима в производственных помещениях [4-6] и гарантирует соблюдение санитарно-гигиенических нормативов содержания поголовья [7, 8].

В современном свиноводстве для регулирования температурно-влажностного режима и организации воздухообмена применяются водоиспарительные системы [9]. Согласно оценкам В.А. Гулевского и др. [9, 10] наиболее универсальные и энергоэффективные климатические системы, функционирующие по принципу адиабатического охлаждения и имеющие орошаемую поверхность, снижают температуру приточного воздуха относительно наружного на 15°C. Модульные водоиспарительные системы можно интегрировать в существующие вентиляционные системы без проведения капитальных строительно-монтажных работ [11-13]. По оценкам В.П. Шацкого, Ю.Г. Иванова, В.В. Кирсанова и др. [9, 14-16] размещение оборудования внутри производственных помещений позволяет снизить затраты на отопление в зимний период в сравнении с панельными системами на 6…9%. Кроме того, водоиспарительная система может быть задействована для дезинфекции воздушной среды, что расширяет ее функциональные возможности [5].

Модульный охладитель-дезинфектор можно применять в стационарном исполнении при агрегатировании с приточными шахтами или в передвижном напольном варианте, при котором движение воздуха побуждается вентилятором (рис. 1). В обоих случаях поток воздуха направляется сверху вниз и поворачивается на 90°.

Такая организация воздушного потока имеет недостатки: во-первых, повышаются потери давления при



а б

Рис. 1. Система вентиляции с применением модульного охладителя-дезинфектора в напольном (а) и подвесном (б) исполнении

Fig. 1. Ventilation system using a modular cooler-disinfector in various designs:
a) floor-standing; b) suspended

повороте потока; во-вторых, воздух по поверхности охлаждающих кассет распределяется неравномерно. В случае с вентилятором ситуация усугубляется, так как поток воздуха закручивается и пульсирует. Описанные явления снижают производительность установки и эффективность охлаждения воздуха. Решение указанных проблем возможно за счет снижения потерь давления при повороте на 90° и равномерного распределения воздушного потока по всей площади охлаждающих кассет модульного охладителя-дезинфектора.

Цель исследований: повышение аэродинамической эффективности модульного охладителя-дезинфектора.

Материалы и методы

Повысить аэродинамическую эффективность модульного охладителя-дезинфектора предлагаем за счет спрямления закрученного потока и обеспечения равномерной подачи воздуха по поверхности охлаждающих кассет. Для реализации поставленных задач применили спрямляющий аппарат *8* и дефлекторы *9* (рис. 2).

Источниками потерь давления в местных сопротивлениях модульного охладителя-дезинфектора являются вход, диффузор, поворот на 90°, увлажняемые кассеты и выход. Наибольшим источником потерь считаются увлажняемые кассеты, однако модернизация конструкции промышленного изделия в рамках данной работы не предусмотрена. Следующим по значению источником потерь являются диффузор и поворот потока на 90° (рис. 2а). Опираясь на работу И.Е. Идельчика, отметим, что наличие за диффузором равномерно распределяющего по сечению сопротивления в виде сетки, решетки или разделительной стенки обеспечивает упорядочивание потока и приводит к некоторому снижению потерь[1].

При равных условиях функционирования установок с дефлекторами и без них расход подаваемого воздуха будет определяться перепадом давления Δp на участке. Изменение расхода воздуха (Q) на участке поворота модульного охладителя определим по формуле:

$$Q = \mu\omega\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}},$$

где μ – коэффициент расхода; ω – площадь модульного охладителя, м^2; Δp – перепад давления на участке, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м^3.

$$\Delta p = \xi\frac{\rho v^2}{2},$$

где v – скорость воздушного потока, м/с; ξ – коэффициент местного сопротивления.

Для диффузоров, снабженных разделительными стенками (дефлекторами), коэффициент местного сопротивления составляет:

$$\xi = 0{,}65\xi_д,$$

где $\xi_д$ – коэффициент местного сопротивления диффузора без разделительной стенки.

Работающий вентилятор на выходе охладителя создает закрученную пульсирующую струю воздуха,

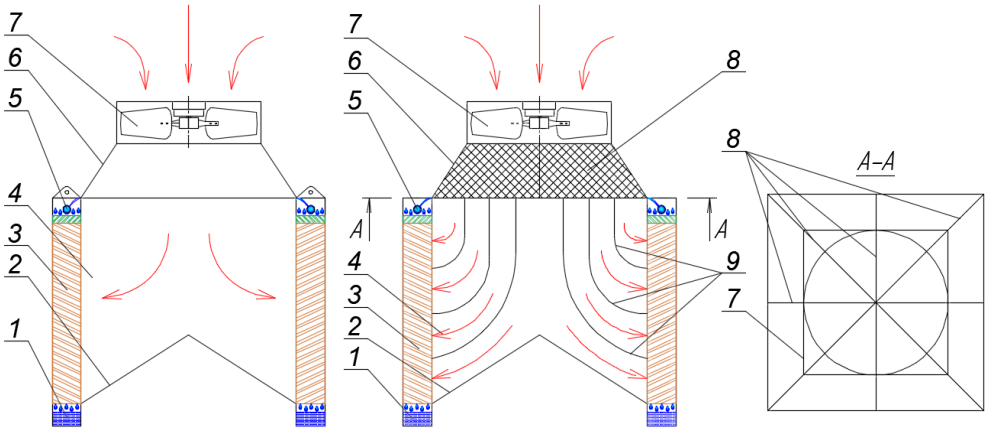


Рис. 2. Модульный охладитель-дезинфектор в исходном (а) и оптимизированном (б) исполнении:
1 – поддон для воды; 2 – угловое дно охладителя; 3 – охлаждающих кассеты; 4 – корпус охладителя; 5 – водопровод; 6 – раструб; 7 – вентилятор; 8 – спрямляющий аппарат; 9 – дефлекторы

Fig. 2. Modular cooler-disinfector in the original (a) and optimized (b) versions:
1 – water tray; 2 – angular bottom of the cooler; 3 – humidified cassettes; 4 – cooler body; 5 – water supply; 6 – bell; 7 – fan; 8 – flow straightener; 9 – deflectors

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

что не позволяет добиться распределения скоростей воздуха с погрешностью, не превышающей стандартные 5%, поэтому требуется кардинальная переработка конструктивной схемы и элементного состава аппарата. При измерении скоростей порядка единиц метров в секунду 1% отклонения составляет 0,02 м/с, достоверное измерение скорости движения воздуха с такой точностью в нестационарном потоке имеет смысл только при оценке динамических характеристик, а добиваться установившегося стационарного потока воздуха в рассматриваемой установке не имеет смысла в отношении экономики. Аппарат является компактным, расстояние от вентилятора до выхода воздуха из установки не превышает 1,7 калибра, а от края спрямляющего аппарата – 1,3 калибра. По общим рекомендациям[2] в линейном воздуховоде режим устанавливается через 3 калибра. Порог чувствительности системы к отклонениям скорости является довольно высоким и проявляется при значениях, превышающих ±10%. Также слеет учесть, что по периметру охлаждающих кассет проявляются краевые эффекты (например, эффект Коанда), поэтому в качестве целевого параметра следует принимать отклонение скорости от среднего арифметического значения не более чем на 20% и на 90% от площади охлаждающих кассет. Указанные значения достижимы и не повлекут за собой кардинальной переработки конструктивной схемы и элементного состава аппарата.

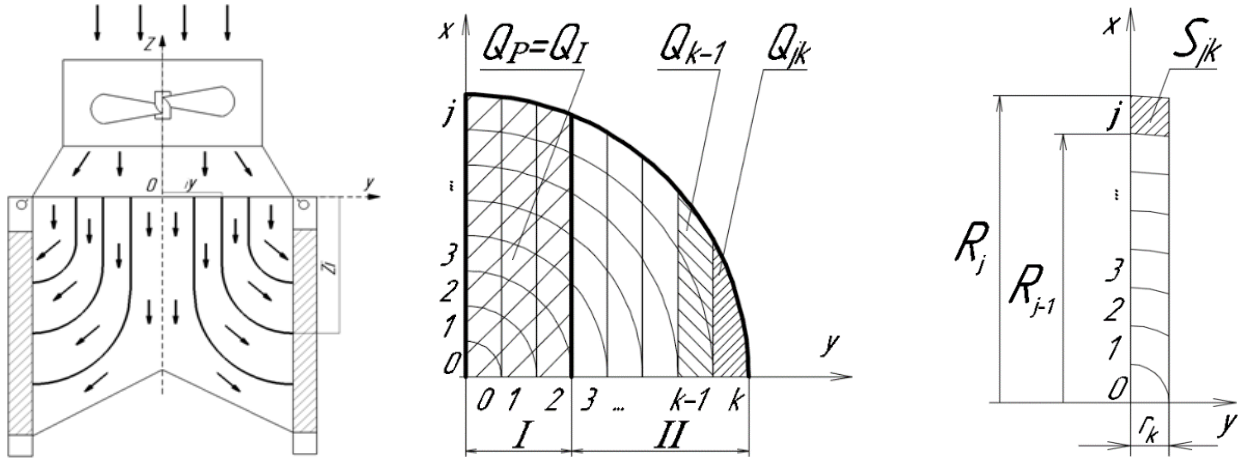
В случае напорной схемы и побуждения потока воздуха вентилятором сталкиваемся с неравномерностью распределения скоростей в сечении вентилятора, закрученностью потока и малым расстоянием от вентилятора до охлаждающих кассет. С целью обеспечения равномерной подачи воздуха на охлаждающие кассеты предлагаем разделить поток от вентилятора до кассет на зоны равного расхода; за оптимальное количество зон принять минимальное, обеспечивающее отклонение от среднего арифметического значения скорости воздуха на выходе из охлаждающих кассет не более чем на 20% и на 90% от площади охлаждающих кассет.

Для решения задачи деления потока воздуха на фрагменты равного расхода следует рассмотреть схему движения воздуха. Вентилятор захватывает охлаждаемый воздух и направляет в спрямляющий аппарат, а затем поток поворачивается на 90° и подается на охлаждающие кассеты (рис. 3а).

Деление установки на зоны равного расхода с помощью дефлекторов позволит снизить потери напора при повороте на 90°. Рассмотрим решение задачи на примере одного дефлектора. В этом случае расход воздуха Q_i, направляемый на i-й участок охлаждающих кассет, определяется по формуле:

$$Q_i = \frac{Q}{z\,n}, \qquad (1)$$

где Q – расход вентилятора установки, м^3/ч; z – количество рабочих поверхностей (сторон); n – количество секций, на которые разделяется поверхность охлаждающих кассет.



а) б) в)

Рис. 3. Схема определения параметров:
а) продольный разрез установки; б) сектор поперечного сечения в срезе (0) от выхода вентилятора;
в) площади элементарного участка воздушной струи

Fig. 3. Parameter determination diagram:
a) longitudinal section of the unit; b) cross-sectional sector at cutoff (0) from the fan outlet;
c) area of the elementary section of the air stream

[2] Иванов О.П., Мамченко В.О. Аэродинамика и вентиляторы: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Холодильные и компрессорные машины и установки». Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. 280 с.

При использовании предложенной схемы количество дефлекторов (z) определяется количеством секций (n), на которые разделяется поверхность охлаждающих кассет: $z = n - 1$. Для обеспечения равномерного распределения воздушного потока по всей площади охлаждающих элементов необходимо определить координаты z_i и y_i установки каждого дефлектора. В случае прямоугольной геометрии кассет их горизонтальная координата z_i может быть найдена по формуле:

$$z_i = \frac{H}{z}, \quad (2)$$

где H – высота охлаждающих кассет, м; z – количество дефлекторов.

Распределение скоростей в сечении вентилятора – осесимметричное неравномерное и зависит от радиуса ($v = f(r)$). Линии равных скоростей представляют собой множество концентрических окружностей с общим центром на оси вентилятора. При установке дефлектора по хорде круга сталкиваемся с нелинейностью деления как по площади, так и по скорости.

Расход воздуха в выделенном секторе можно определить по формуле:

$$Q_{jk} = \sum_{0}^{k}\sum_{0}^{j} v_j s_{jk}, \quad (3)$$

где j – номер кольцевого сечения; k – номер ряда; v_k – скорость элементарной струйки в j-м кольце, м/с; S_{kj} – площадь элементарной струйки, м^2.

В случае деления потока хордой расходы воздуха в сегментах должны быть одинаковыми. Определим координату положения дефлектора, обеспечивающую деление потока на равные доли:

$$y_i = \Delta r m_i, \quad (4)$$

где Δr – ширина ряда, м; m_i – количество рядов в участке.

С целью обеспечения требуемой точности результаты вычислений должны отвечать следующему условию:

$$\delta = \frac{Q_{k\,\max}}{2Q_p} \cdot 100\% \le [\delta], \quad (5)$$

где $Q_{k\,\max}$ – максимальное значение расхода одного ряда, м^3/ч; $[\delta]$ – допустимое значение погрешности, %.

Начальную ширину ряда следует определять по формуле:

$$\Delta r \le \frac{2\pi R_в [\delta]}{zp \cdot 100\%}, \quad (6)$$

где $R_в$ – радиус вписанной окружности сечения спрямляющего аппарата, м; z – количество сторон (рабочих поверхностей аппарата); p – количество участков.

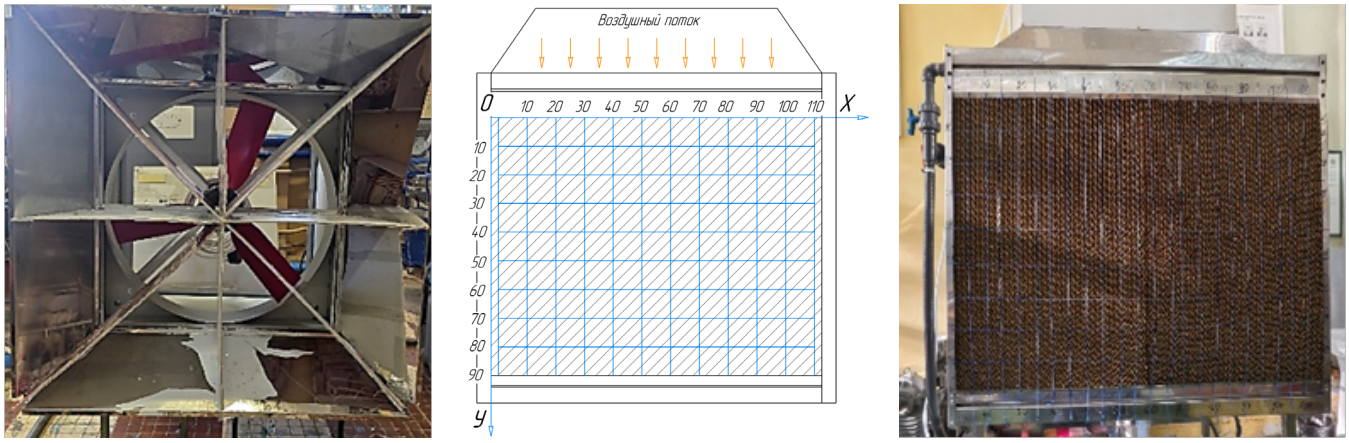
Для вычислений необходимо получить зависимость скорости потока от радиуса вентилятора. Наиболее точные результаты получились при определении скорости потока по измеренному значению динамического давления:

$$v = \sqrt{\frac{2p_{дин}}{0{,}95\rho}},$$

где $p_{дин}$ – динамическое давление в контрольной точке измерения, м/с; ρ – плотность воздуха, кг/м^3; 0,95 – коэффициент восстановления трубки Пито.

Измерение давления воздушного потока выполняли с шагом 50 мм по направлению от центра к периферии (рис. 4а).

Для определения динамического давления использовали комбинированный измерительный комплекс, включающий в себя трубку Пито, соединенную с пьезометром. Подключение данной системы к дифференциальному манометру обеспечивает



а б в

Рис. 4. Опытный образец установки:
а) вентилятор и раструб со спрямляющим аппаратом; б) схема размещения точек измерения; в) общий вид установки

Fig. 4. Experimental model of the installation:
a) fan and funnel with a flow straightener; b) diagram of the placement of measurement points; c) general view of the installation

прямое считывание значений аэродинамической составляющей давления без необходимости дополнительных вычислений. Использовались приборы стенда «Типовой комплект учебного оборудования ОГД-10-13ЛР-01». Далее определяли расход воздуха, проходящий через охлаждающие кассеты, на основании замера его скорости на выходе из кассет с помощью крыльчатого анемометра Benetech GM8902. Для этого вся поверхность охладительной кассеты была разбита на квадраты (рис. 4б). Измерение скорости проводили в центрах выделенных квадратов в трехкратной повторности.

Для количественной оценки равномерности распределения скорости воздуха по поверхности охлаждающих кассет использовали коэффициент вариации $K\upsilon$:

$$K\upsilon = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad (7)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение, м/с; $\bar{x}$ – среднеарифметическое значение скорости воздушного потока, м/с.

Результаты и их обсуждение

По результатам измерений скорости воздуха на выходе из спрямляющего аппарата получили данные, представленные на рисунке 5. В результате аппроксимации результатов получили математическую зависимость изменения скорости воздуха от радиуса вентилятора:

$$v = -502{,}42 \cdot r^4 + 276{,}5 \cdot r^3 - 14{,}358 \cdot r^2 + 13{,}191 \cdot r. \quad (8)$$

Коэффициент детерминации полученной модели – 0,95.

На основе экспериментальных данных установлено, что при использовании одного дефлектора оптимальное расстояние от центра сечения составляет 250 мм. При установке дефлектора на расстояние R/2 (225 мм) соотношение расходов в образовавшихся секциях составляет 0,44/0,56.

Согласно формуле (6) в случае необходимости разделения потока на три секции шаг дискретности следует принимать как менее 43 мм, а для четырех секций – соответственно 25 мм.

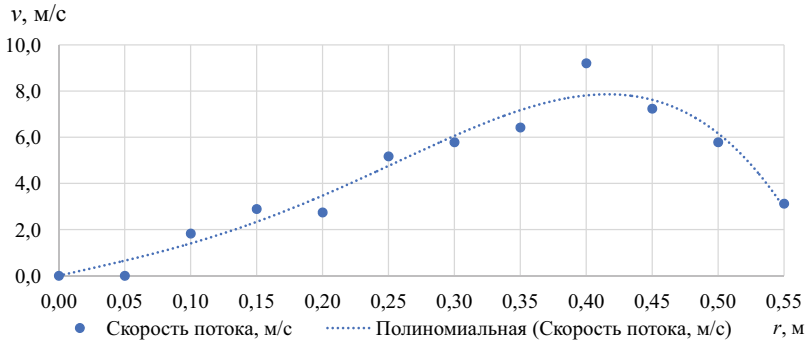


Рис. 5. Распределение скорости потока в сечении спрямляющего аппарата

Fig. 5. Velocity distribution in the section of the straightener

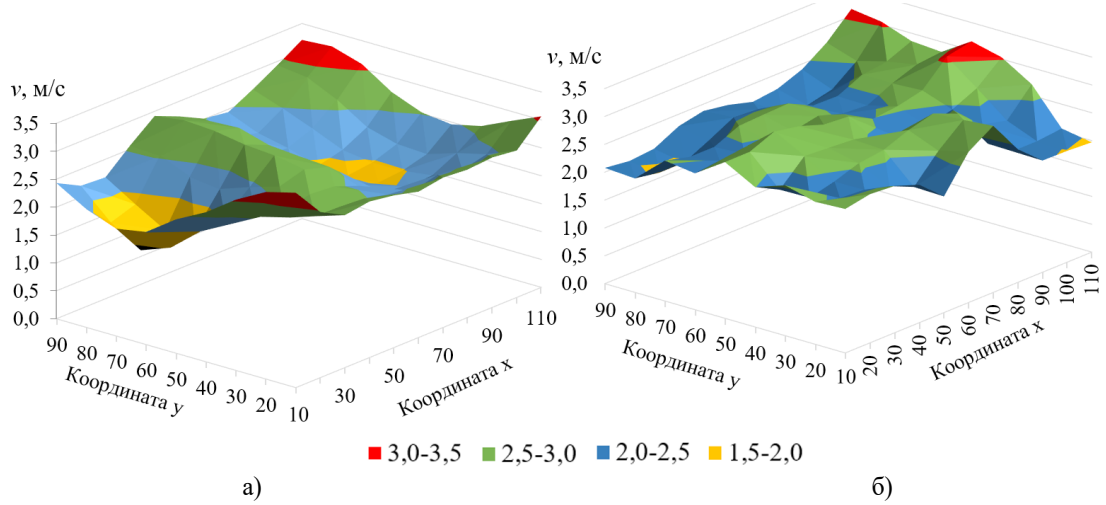


Рис. 6. Распределение скорости воздуха по площади охлаждающих кассет:
а) исходный вариант; б) оптимизированный вариант

Fig. 6. Air velocity distribution across the cooling cassette surface:
a) original version; b) optimized version

При установке трех дефлекторов и спрямляющего аппарата наблюдали положительную динамику выравнивания поля скоростей (рис. 6).

Для предложенной схемы модульного охладителя выполнили расчеты величин суммарных потерь давления для двух вариантов компоновки установки: без дефлекторов и со спрямляющим аппаратом и тремя дефлекторами. Расчеты показали, что основную долю потерь (около 90%) составляют местные потери давления на орошаемом мате; их модернизация в рамках данной работы не рассматривалась.

Сравнительный анализ показал снижение потерь давления модульного охладителя с дефлекторами на 4,01% в сравнении образцом без дефлектора.

Прирост производительности установки с учетом влияния расчетного значения суммарных потерь давления в охладителе без дефлекторов (Q) по отношению к установке с дефлекторами ($Q_д$) определим из выражения:

$$\frac{Q}{Q_д} = \frac{A\sqrt{p_\Sigma}}{A\sqrt{0,96\,p_\Sigma}} = 1,02 \text{ раза},$$

где p_Σ – суммарные потери давления в установке.

Из представленного соотношения следует, что прогнозируемый прирост производительности установки с дефлекторами составляет 2%.

Оценка экспериментальных значений средних скоростей исходной и оптимизированной конструкции охладителя (с дефлекторами) (табл.) подтверждает теоретический прогноз по повышению производительности:

$$\frac{v_о}{v_и} = \frac{2,49}{2,45} = 1,016,$$

где $v_и$ – средняя скорость в исходной конструкции, м/с; $v_о$ – средняя скорость в оптимизированной конструкции, м/с.

Применение спрямляющего аппарата и дефлекторов обеспечивает прирост средней скорости потока (табл.) и увеличение повышение установки на 289 м^3/ч. Сходимость экспериментальных и теоретических значений составляет 80%.

Отклонения скорости потока от среднего значения снизились с 45 до 24%. Доля площади с отклонениями, не превышающими 10%, возросла на 35% и достигла 62%. На 90% площади охлаждающих кассет отклонение скорости от среднего значения не превышает 20%. Результаты статистической обработки данных представлены в таблице.

Оптимизация аэродинамических параметров установки обеспечила снижение коэффициента вариации скорости воздушного потока на 28,6%, что свидетельствует о существенном повышении равномерности его распределения вдоль водоиспарительных поверхностей модульного охладителя-дезинфектора.

Таблица

Результаты статистической обработки данных по распределению скоростей

Table

Results of statistical processing of speed distribution data

Версия охладителя	Параметр			
	Средняя скорость, м/с	Стандартное отклонение, м/с	Коэффициент вариации *Kv*	Снижение *Kv*, %
Исходная	2,45	0,40	0,16	28,6
Оптимизированная	2,49	0,29	0,12	

Выводы

Установка спрямляющего аппарата и трех дефлекторов в модульном охладителе-дезинфекторе обеспечивает отклонение скорости потока воздуха в пределах 20% на 90% площади охлаждающих кассет. При этом равномерность распределения скорости воздуха по поверхности охлаждающих кассет увеличилась на 28,6%, коэффициент вариации составил 0,12. Производительность установки возросла на 289 м^3/ч.

Список источников

1. Тихомиров А.В., Маркелова Е.К., Тихомиров Д.А. Основные направления по совершенствованию систем и средств энергообеспечения сельхозобъектов // Агротехника и энергообеспечение. 2017. № 3 (16). С. 34-42. EDN: ZGUDUF

2. Тихомиров Д.А., Тихомиров А.В. Совершенствование и модернизация систем и средств энергообеспечения – важнейшее направление решения задач повышения

References

1. Tikhomirov A.V., Markelova E.K., Tikhomirov D.A. The main directions for improvement of systems and means of energy supply of agricultural objects. *Agrotekhnika i energoobespechenie.* 2017;3:34-42. (In Russ.)

2. Tikhomirov D.A., Tikhomirov A.V. Improvement and modernization of systems and energy supply means -the most important direction in problem solution of agricultural production energy

энергоэффективности сельхозпроизводства // Техника и оборудование для села. 2017. № 11. С. 32-36. EDN: ZTMESB

3. Игнаткин И.Ю., Шевкун Н.А., Архипцев А.В. и др. 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

4. Гулевский В.А., Рязанцев А.А. О возможностях водоиспарительного охлаждения в свиноводческих помещениях // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. 2017. № 1. С. 145-152. EDN: YNUJET

5. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Энергосбережение при обеспечении микроклимата в свиноводстве: Монография. М.: Редакция журнала «Механизация и электрификация сельского хозяйства», 2020. 178 с. EDN: RTLOAC

6. Гулевский В.А., Евсюкова В.П. Эффективность работы водоиспарительных агрегатов охлаждения прямого и косвенного принципов действия // Актуальные вопросы физико-математических и технических наук в свете современных исследований АПК: Материалы Национальной научно-практической конференции, г. Воронеж, 23 октября 2024 г. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2024. С. 161-164. EDN: HSPJHA

7. Борулько В.Г., Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Шлычкова Н.А. Математическая модель влияния параметров микроклимата в коровнике на клинико-физиологические показатели животных // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 2. С. 74-77. https://doi.org/10.51794/27132064-2021-2-74

8. Иванов Ю.Г., Понизовкин Д.А., Мошонкин А.М., Жумагулов Ж.Б. Анализ математических моделей контроля параметров, характеризующих состояние теплового стресса животных на молочных фермах // Техника и технологии в животноводстве. 2023. № 4. С. 36-41. https://doi.org/10.22314/27132064-2023-4-36

9. Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю. Система микроклимата в свиноводстве с применением охладителей новой конструкции // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2014. № 5. С. 18-20. EDN: UXQNTN

10. Гулевский В.А., Евсюкова В.П., Маковичко В.С. Экспериментальные исследования работы агрегатов охлаждения воздуха // Тенденции развития технических средств и технологий в АПК: Материалы Международной научно-практической конференции, г. Воронеж, 12 февраля 2024 г. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2024. С. 245-249. EDN: JTDUWD

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

12. Ильин И.И., Смолинский Е.А., Нестерова О.М. Новые технологии в проектировании, реконструкции и строительстве свиноводческих комплексов // Перспективное свиноводство: теория и практика. 2010. № 2. С. 13. EDN: NBVWCV

13. Шацкий В.П., Высоцкая Ж.В., Гулевский В.А. К вопросу о работе водоиспарительных охладителей // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2008. № 3. С. 95-99. EDN: JVFKFJ

14. Шацкий В.П., Чесноков А.С. Варианты монтажа и характеристики работы водоиспарительных охладителей // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2010. № 3. С. 32-39. EDN: MTZYKJ

15. Иванов Ю.А., Иванов Ю.Г., Борулько В.Г., Понизовкин Д.А. Организация системы вентиляции с водоиспарительным охлаждением для производственных зон коровника

efficiency improvement. *Machinery and Equipment for Rural Area***.** 2017;11:32-36. (In Russ.)

3. Ignatkin I.Yu., Shevkun N.A., Arkhiptsev A.V. et al. 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

4. Gulevsky V.A., Ryazantsev A.A. About the possibilities photospreteen cooling in pig-breeding premises. *Konstruirovanie, ispolzovanie i nadezhnost mashin selskokhozyaystvennogo naznacheniya.* 2017;1:145-152. (In Russ.)

5. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Energy efficiency in microclimate control for pig farming: Monograph. Moscow: Editorial office of the *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva Journal*, 2020. 178 p. (In Russ.)

6. Gulevsky V.A., Evsyukova V.P. The efficiency of water vaporizing cooling units of direct and indirect principles of action. *Aktualnye voprosy fiziko-matematicheskikh i tekhnicheskikh nauk v svete sovremennykh issledovaniy APK*: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference, Voronezh, October 23, 2024. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2024. P. 161-164. (In Russ.)

7. Borulko V.G., Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Shlychkova N.A. Mathematical model of cowshed microclimate parameters influence on animals clinical-and-physiological parameters. *Machinery and Technologies in Livestock***.** 2021;2:74-77. (In Russ.) https://doi.org/10.51794/27132064-2021-2-74

8. Ivanov Yu.G., Ponizovkin D.A., Moshonkin A.M., Zhumagulov Zh.B. Mathematical model of the effect of cowshed microclimate parameters on the clinical and physiological parameters of cattle. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2023;4:36-41. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/27132064-2023-4-36

9. Kazantsev S.P., Ignatkin I.Yu. System microclimate in livestock using coolers new design. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya selskogo khozyaystva*. 2014;5:18-20. (In Russ.)

10. Gulevsky V.A., Evsyukova V.P., Makovichko V.S. Experimental studies of the operation of air cooling units. *Tendentsii razvitiya tekhnicheskikh sredstv i tekhnologiy v APK*: *Proceedings of the International scientific and practical conference*, Voronezh, February 12, 2024. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter I, 2024. Pp. 245-249. (In Russ.)

11. Tikhomirov D.A. The ventilation and heating system is modular. *Selskiy mekhanizator*. 2012;9:32-33. (In Russ.)

12. Ilyin I.I., Smolinsky E.A., Nesterova O.M. Advanced technologies in the design, reconstruction, and construction of pig-breeding facilities. *Perspektivnoe svinovodstvo*: *teoriya i praktika*. 2010;2:13. (In Russ.)

13. Shatsky V.P., Vysotskaya Zh.V., Gulevsky V.A. On the operation of evaporative coolers. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineer*ing. *Construction and Architecture*. 2008;3:95-99. (In Russ.)

14. Shatsky V.P., Chesnokov A.S. Aircoolers variants of their installation and characteristics of work. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2010;3:32-39. (In Russ.)

15. Ivanov Yu.A., Ivanov Yu.G., Borulko V.G., Ponizovkin D.A. Organization of a ventilation system with evaporative cooling for the cowshed's producing areas. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2024;14(4):31-36. (In Russ.) https://doi.org/10.22314/27132064-2024-14-4-31

16. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Mathematical model of water evaporative cooling in ventilation system. *Vestnik of Federal State Educational Establishment of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V.P. Goryachkin"*. 2017;1(77):14-20. (In Russ.)

// Техника и технологии в животноводстве. 2024. Т. 14, № 4. С. 31-36. https://doi.org/10.22314/27132064-2024-14-4-31

16. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Математическая модель водоиспарительного охлаждения в системах вентиляции // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». 2017. № 1 (77). С. 14-20. EDN: XVDGIX

Информация об авторах

[1] **Игнаткин Иван Юрьевич,** д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры сопротивления материалов и детали машин; ignatkin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973; SPIN-код: 4391-8002

[2] **Прокофьев Михаил Михайлович,** аспирант 1 курса аспирантуры Института механики и энергетики имени В.П. Горячкина; m.prokofiev@rgau-msha.ru; SPIN-код: 8069-9252

[3] **Шевкун Николай Александрович,** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и теплоэнергетики имени академика И.А. Будзко; energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828; SPIN-код: 5852-6284

[4] **Золотарев Сергей Васильевич,** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры ландшафтной архитектуры; zolotarev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3615-6130; SPIN-код: 9217-4310.

[1, 2, 3, 4] Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49

Вклад авторов

Игнаткин И.Ю. – руководство исследованиями, концептуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;
Прокофьев М.М. – проведение исследований, визуализация, создание черновика рукописи;
Шевкун Н.А. – ресурсы, формальный анализ;
Золотарев С.В. – ресурсы, формальный анализ.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 14.04.2026, после рецензирования и доработки 07.07.2026, принята к публикации 08.07.2026

Author Information

I.Yu. Ignatkin [1], DSc (Eng), Associate Professor, Professor, Department of Resistance of Materials and Machine Parts, ignatkin@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-4867-1973; Scopus Author ID: 57222543815

M.M. Prokofiev [2], postgraduate student; the Institute of Mechanical and Power Engineering named after V.P. Goryachkin; m.prokofiev@rgau-msha.ru

N.A. Shevkun [3], PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of the I.A. Budzko Department of Electric Power Supply and Thermal Energy, energo-shevkun@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0001-7451-7828; Scopus Author ID: 57222576008

S.V. Zolotarev [4], DSc (Eng), Professor, Professor of the Department of Landscape Architecture, zolotarev@rgau-msha.ru; https://orcid.org/0000-0003-3615-6130

[1, 2, 3, 4] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation

Author Contribution

Ignatkin I.Yu. – research supervision, conceptualization, writing – review and editing of the manuscript;
Prokofiev M.M. – investigation, visualization, writing – original draft;
Shevkun N.A. – resources, formal analysis;
Zolotarev S.V. – resources, formal analysis;

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest and are responsible for plagiarism

Received 14.04.2026; Revised 07.07.2026; Accepted 08.07.2026