

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 697.278:631.22

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-93-101>



Физическое моделирование теплового режима животноводческого помещения с комбинированной системой электротеплоаккумуляционного обогрева

Д.А. Тихомиров¹, А.В. Хименко²✉, А.В. Кузьмичев²

^{1, 2, 3} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия

¹ tiha@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

² avmkh87@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0003-2612-969X>

³ alkumkuzm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4655-6448>

Аннотация. Параметры микроклимата на животноводческих фермах зависят от способа теплообеспечения и воздухообмена. Для повышения сохранности и продуктивности животных предложено использовать разработанный энергоэффективный электрический теплоаккумуляционный обогреватель (КЭТО), состоящий из аккумуляционного блока и блока прямого нагрева, совместно с потолочным вентилятором. Исследования проведены с целью оценки влияния работы потолочного вентилятора на параметры микроклимата в зоне расположения животных при его совместной работе с комбинированным электрическим теплоаккумуляционным обогревателем. Замеры параметров микроклимата (температуры и скорости) производили в нескольких точках по высоте помещения в двух режимах: при работающем потолочном вентиляторе и без него. В результате исследований получили интерполяционные полиномы зависимости изменения температуры воздуха с учетом расстояния от вертикальной оси потолочного вентилятора при двух режимах и зависимости распределения скорости воздуха в помещении при работающем вентиляторе. Установлено, что совместная работа КЭТО с потолочным вентилятором позволяет повысить температуру воздуха в рабочей зоне отапливаемого помещения на 2...3°C при снижении мощности системы теплообеспечения не менее чем на 15%. Энергосберегающий эффект достигается за счет использования теплоты воздуха, скапливающегося в верхней зоне помещения (под потолком), при его подаче потолочным вентилятором в рабочую зону. Результаты экспериментальных исследований применения КЭТО совместно с потолочными вентиляторами показали более равномерное распределение температуры воздуха по высоте помещения при соблюдении нормативной скорости движения воздуха в рабочей зоне (не более 0,2...0,4 м/с). Результаты исследований могут быть использованы при проектировании энергосберегающих систем электротеплоаккумуляционного обогрева животноводческих помещений ферм КРС и разработке типоразмерного ряда КЭТО.

Ключевые слова: ферма КРС; микроклимат; вентилятор; потолочный вентилятор; электрический теплоаккумуляционный обогреватель; воздухообмен; обогрев

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ФГБНУ ФНАЦ ВИМ FGUN-2025-0004.

Для цитирования: Тихомиров Д.А., Хименко А.В., Кузьмичев А.В. Физическое моделирование теплового режима животноводческого помещения с комбинированной системой электротеплоаккумуляционного обогрева // Агроинженерия. 2026. Т. 28, № 4. С. 93-101. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-93-101>

ORIGINAL ARTICLE

Physical modeling of the thermal mode of a livestock building with a combined electric thermal storage heating system**D.A. Tikhomirov¹, A.V. Khimenko^{2✉}, A.V. Kuzmichev³**^{1,2,3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>² avmkh87@gmail.com✉; <https://orcid.org/0000-0003-2612-969X>³ alkumkuzm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4655-6448>

Abstract. Indoor climate parameters on livestock farms depend on the heat supply and air exchange methods. To improve the survival rate and productivity of animals, it is proposed to use a developed energy-efficient combined electric thermal storage heater (CETSH), consisting of a storage unit and a direct heating unit, in conjunction with a ceiling fan. The research aimed to assess the effect of ceiling fan operation on indoor climate parameters in the animal-occupied zone during its joint operation with a combined electric thermal storage heater. Measurements of indoor climate parameters (temperature and velocity) were taken at several points along the height of the room in two modes: with the ceiling fan in the position “ON” and “OFF”. As a result, interpolation polynomials were obtained for the dependence of air temperature change taking into account the distance from the vertical axis of the ceiling fan in two modes, and for the dependence of air velocity distribution in the room with the fan operating. It was established that the joint operation of the CETSH with a ceiling fan makes it possible to increase the air temperature in the working zone of the heated room by 2 to 3°C while reducing the power of the heat supply system by at least 15%. The energy-saving effect is achieved by utilizing the heat of air accumulating in the upper zone of the room (under the ceiling) when it is supplied by the ceiling fan to the working zone. The results of experimental studies on the use of CETSH together with ceiling fans showed a more uniform distribution of air temperature along the height of the room while maintaining the standard air velocity in the working zone (not exceeding 0.2 to 0.4 m/s). The research results can be used in the design of energy-saving electric thermal storage heating systems for livestock buildings on cattle farms and in the development of a standard size range of CETSH.

Keywords: cattle farm; indoor climate; fan; ceiling fan; electric thermal storage heater; air exchange; air heating

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM (No. FGUN-2025-0004).

For citation Tikhomirov D.A., Khimenko A.V., Kuzmichev A.V. Physical modeling of the thermal mode of a livestock building with a combined electric thermal storage heating system. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2026;28(4):93-101. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2026-4-93-101>

Введение

Применение на животноводческих фермах энергетического оборудования, в том числе для обогрева помещений, и высокая концентрация животных, являющихся источником теплоты, приводят к возникновению вертикального температурного градиента по высоте помещения. Менее плотный нагретый воздух, скапливаясь под потолком помещения, образует воздушную тепловую «подушку», а холодный и более влажный воздух скапливается в нижней части помещения у пола в зоне пребывания животных. В зависимости от высоты помещения разность температуры воздуха у потолка и пола может достигать 3...6°C. При этом в зоне расположения животных (0,5...1,0 м от пола) в холодный период года температура воздуха

часто не соответствует требуемым методическими рекомендациями по технологическому проектированию животноводческих ферм значениям. Применяемые в животноводческих помещениях приточно-вытяжные системы вентиляции и различные конструкции воздухораспределителей в большинстве случаев лишь частично решают поставленную задачу.

Для повышения интенсивности циркуляции воздуха разрабатываются системы вентиляции и кондиционирования [1] и вентиляционное оборудование, обеспечивающее движение воздушного потока в помещении по замкнутой траектории [2, 3]; предлагают комбинированную работу естественной вентиляции и потолочных вентиляторов [4]; выявляют факторы, влияющие на скорость воздушного

потока в помещении, создаваемого потолочными вентиляторами [5, 6].

Установлено, что применение потолочного вентилятора позволяет снизить концентрацию аэрозолей на высоте 1,5...2,0 м от пола (в зоне дыхания человека) более чем на 20% [7, 8]. Применение потолочных вентиляторов совместно с системой обогрева улучшает циркуляцию и подвижность воздуха (с допустимой скоростью движения в зоне нахождения животных), вследствие чего выравнивается температура воздуха по высоте помещения, снижаются тепловые потери через ограждающие конструкции, увеличивается коэффициент теплоотдачи отопительных приборов. У потолочных вентиляторов за счет регулирования частоты вращения двигателя можно изменить производительность, а соответственно и скорость движения воздуха. Вентиляторы в помещении можно устанавливать над зоной расположения животных, что позволит локально регулировать температуру воздуха в зависимости от их возраста и состояния [9, 10].

В качестве источников обогрева небольших помещений при групповом содержании телят, а также бытовых и технологических помещений ферм КРС предлагаются электронагревательные установки с аккумуляцией теплоты конвективного типа [9, 11, 12]. Разработана методика теплового расчета основных параметров системы электротеплоаккумуляционного отопления с центральной электрической теплоаккумуляционной установкой (ЭТАУ). На основании экспериментальных данных произведены расчеты количества аккумулируемой теплоты центральным ЭТАУ и теплоотдачи в воздушных каналах различной геометрии [13] и расчеты тепловых характеристик электрического теплоаккумуляционного обогревателя (ЭТО) динамического типа в режимах заряда и отдачи теплоты [14-16].

Актуальной задачей снижения энергозатрат на производство сельхозпродукции при повышении сохранности и продуктивности животных представляется совместное использование энергоэффективного электрического теплоаккумуляционного обогревателя, работающего по временному графику (периодического действия), и потолочного вентилятора.

Цель исследований: оценить влияние работы потолочного вентилятора на параметры микроклимата в зоне расположения животных при его совместной работе с комбинированным электрическим теплоаккумуляционным обогревателем (КЭТО).

Материалы и методы

На основании проведенного анализа часовых и суточных графиков потребления тепловой

и электрической энергии типовых ферм КРС обоснована возможность применения электрических теплоаккумуляционных установок для теплообеспечения технологических помещений с временным пребыванием персонала (помещения для содержания телят, ветсанпропускник, ветпункт, кормоприготовительные, моечные, бытовые помещения, помещения для обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники) [17].

При работе по временному графику теплоаккумуляционная отопительная установка должна вырабатывать необходимое количество теплоты в течение суток для обеспечения требуемых параметров микроклимата. У подавляющего большинства конструкций аккумуляционных электроотопительных установок в период заряда вся вырабатываемая тепловая энергия расходуется на нагрев теплоаккумулирующего сердечника. В ночное время температура воздуха в помещении может снизиться ниже нормируемых значений. Предлагается решить данную проблему путем добавления в конструкцию теплоаккумуляционного обогревателя дополнительного электронагревателя (электрокалорифера).

Функциональная схема комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя (КЭТО) показана на рисунке 1.

Конструкция КЭТО представляет собой два независимых нагревательных блока: блок аккумулярования (теплоаккумулятор) и блок прямого нагрева (электрокалорифер). Блок аккумулярования включает вентилятор В1, электронагреватели (ТЭНы), теплоаккумулирующий сердечник и управляемую воздушную заслонку (УВЗ). Блок прямого нагрева включает вентилятор В2 и электрический калорифер ЭК. Электрокалорифер может работать как в период заряда, так и в период отдачи теплоты (разряда) теплоаккумулятора (ТА). Комбинированный электрический теплоаккумуляционный обогреватель (КЭТО) предполагает совместную работу с потолочным вентилятором (ПВ), поэтому шкаф автоматического управления (ШУ) осуществляет контроль и управление КЭТО и ПВ.

На основе предложенной функциональной схемы разработана физическая модель КЭТО (рис. 2).

Мощность физической модели КЭТО рассчитывали на основе данных и рекомендаций¹ [14] и в соответствии с обоснованным типоразмерным рядом теплоаккумуляционных отопительных установок [18]. Электрическая мощность блока аккумулярования

¹ Богословский В.Н., Новожилов В.И., Симаков Б.Д., Титов В.П. Отопление и вентиляция: В 2 ч. Ч. 2. Вентиляция. М.: Стройиздат. 1976. 439 с.

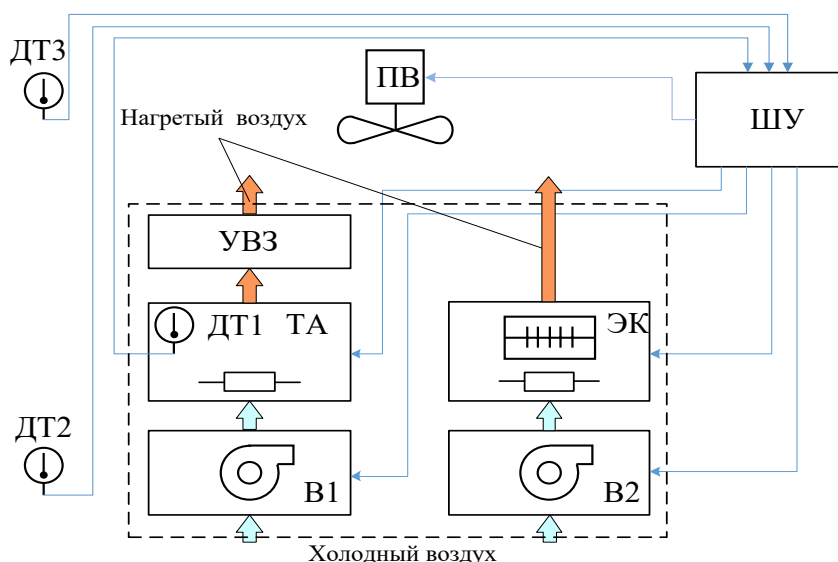


Рис. 1. Функциональная схема комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя (КЭТО):

DT1...DT3 – датчики температуры; B1, B2 – вентиляторы; ТА – теплоаккумулятор с электрическим нагревателем; УВЗ – управляемая воздушная заслонка; ЭК – электрокалорифер; ШУ – шкаф управления; ПВ – потолочный вентилятор

Fig. 1. Functional flow diagram of a combined electric thermal-storage heater (CETSH):

TS1 to TS3 – temperature sensors; F1, F2 – fans; TS – thermal-storage with electric heater; CAD – controlled air damper; EH – electric heater; CP – control panel; CF – ceiling fan

КЭТО принята как $P_{\text{это}} \approx 2$ кВт (3 ТЭНа по 0,63 кВт), мощность блока прямого нагрева – электрокалорифера – $P_{\text{э}} = 1$ кВт (2 ТЭНа по 0,5 кВт). В блоке забора воздуха и электрокалорифера КЭТО установлены по одному тангенциальному вентилятору мощностью 27 Вт и производительностью 135 м³/ч (рис. 2).

Измерение температуры воздуха по высоте производили с помощью измерительной стойки 5 в пяти характерных точках (Т1-Т5) (рис. 3) при совместной работе КЭТО и потолочного вентилятора.

Измерительная стойка состоит из двух соединенных между собой металлических прутков, на которых через 0,5 м от отметки 0,1 до 2,1 м от уровня пола установлены пять датчиков температуры TSM50M (предел основной приведенной погрешности – 0,25%). Температуру воздуха измеряют на выходе из ЭТО 3 (Т6, TSM50M), температуру воздуха на выходе из блока прямого нагрева КЭТО 2 (Т7, TSM50M) и температуру поверхности корпуса комбинированного КЭТО (Т8, датчик ТХ-К(L) с пределом основной приведенной погрешности 0,5%). В качестве вторичного преобразователя температур (блок измерения) использовали модуль ввода – аналоговый измерительный 8-канальный ОБЕН МВА8 (класс точности – 0,25; 0,5).

Общий вид лабораторного стенда для исследования теплового режима помещения при совместной работе КЭТО и потолочного вентилятора показан на рисунке 4.



Рис. 2. Физическая модель комбинированного электрического теплоаккумуляционного обогревателя (КЭТО):

1 – корпус электрического теплоаккумуляционного обогревателя; 2, 3 – высокотемпературная тепловая изоляция; 4 – ТЭНы теплоаккумулирующего сердечника КЭТО; 5 – теплоаккумулирующий сердечник КЭТО; 6 – тангенциальный вентилятор разряда (забора воздуха) КЭТО; 7 – тангенциальный вентилятор электрокалорифера; 8 – корпус блока электрокалорифера; 9 – ТЭНы электрокалорифера

Fig. 2. CETSH physical model:

1 – CETSH housing; 2,3 – high-temperature thermal insulation; 4 – heating elements heat-storage core of CETSH; 5 – CETSH heat-storage core; 6 – CETSH tangential discharge fan (air intake); 7 – tangential fan of the electric heater; 8 – electric heater block housing; 9 – heating elements of the electric heater

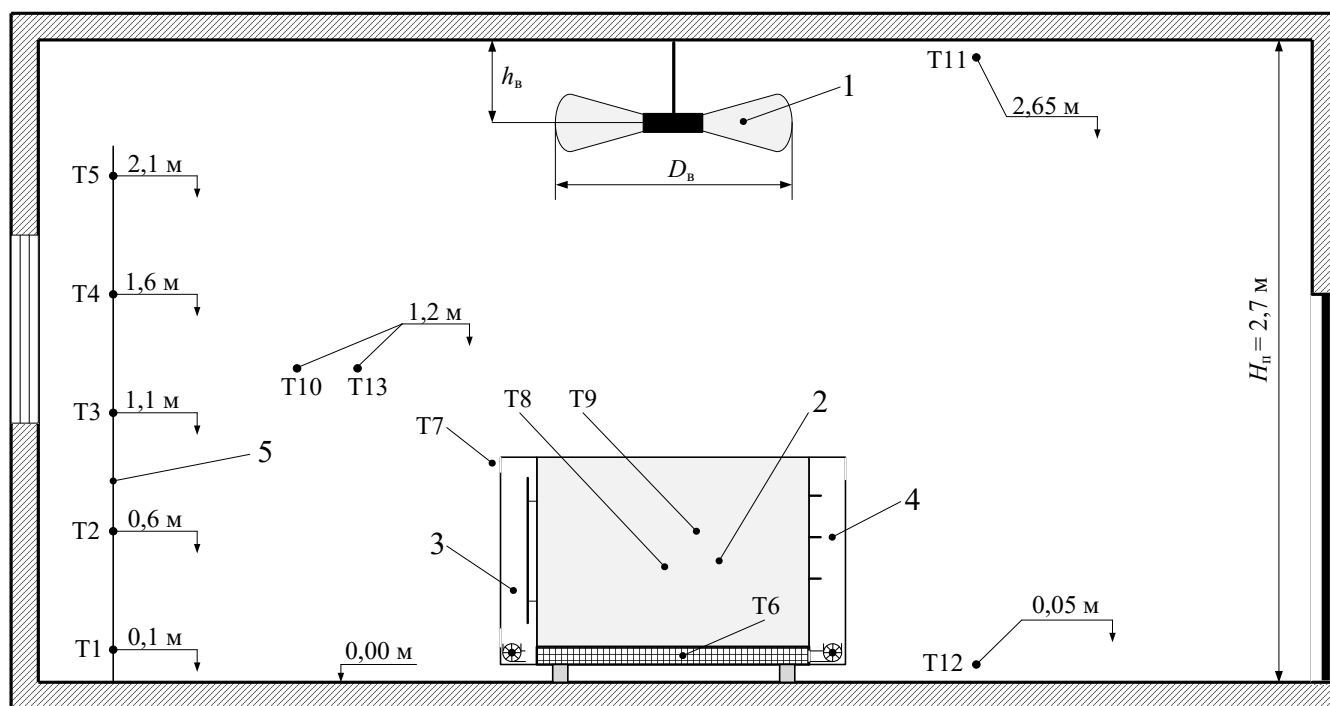


Рис. 3. Схема размещения датчиков температуры в исследуемом помещении:

- 1 – потолочный вентилятор; 2 – комбинированный электрический теплоаккумуляционный обогреватель (физическая модель КЭТО); 3 – блок прямого нагрева (электрокалорифер (ЭТО) с тангенциальным вентилятором); 4 – блок подключения ТЭНов и забора воздуха с тангенциальным вентилятором КЭТО; 5 – измерительная стойка

Fig. 3. Layout of temperature sensors placement in the test premises:

- 1 – ceiling fan; 2 – CETSH unit (physical model); 3 – direct heating unit of CETSH: electric heater with a tangential fan; 4 – heating element connection unit and air intake unit with a tangential fan of CETSH; 5 – measuring rack

Размеры исследуемого помещения: длина $L_n = 5,4$ м; ширина $B_n = 3,5$ м; высота $H_n = 2,7$ м. Измерения скорости движения воздуха в исследуемом помещении $v_{n,cr}$ при работе КЭТО совместно с потолочным вентилятором выполняли по высоте помещения в 4 характерных точках через 0,5 м от отметки 0,6 м до отметки 2,1 м от уровня пола с помощью термоанемометра ТТМ-2-02-2 с выносным зондом с диапазоном измерения от 0,1 до 10 м/с и точностью измерения до 10%.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования температуры воздуха в помещении при совместной работе потолочного вентилятора и КЭТО в период отдачи теплоты в зависимости от высоты от уровня пола и расстояния от вертикальной оси подвеса потолочного вентилятора представлены на рисунке 5.

Замеры параметров микроклимата помещения температуры и скорости производили в двух режимах: при работе потолочного вентилятора и без него. При выключенном вентиляторе температура воздуха в помещении на уровне $h_{wa} = 1$ м от пола составляла 11...12°C.

С помощью математического пакета Maple17 выполнена аппроксимация данных с использо-

ванием метода наименьших квадратов и получен интерполяционный полином зависимости распределения температуры воздуха в помещении при неработающем потолочном вентиляторе t_p и работающем t_p^B :

$$t_p = 1,35h_p^2 + 0,03h_p r - 0,1r^2 - 1,26h_p + 0,2r + 11,38; \quad (1)$$

$$t_p^B = -0,6h_p^2 + 0,064h_p r - 0,12r^2 + 3,59h_p + 0,21r + 12,08, \quad (2)$$

где h_p – высота помещения от уровня пола, м; r – расстояние (удаленность) от вертикальной оси подвеса потолочного вентилятора, м.

Выбор диаметра лопастей потолочного вентилятора и частоты вращения будет зависеть от высоты помещения и требуемой скорости движения воздуха в зоне нахождения животных. Методика расчета параметров потолочного вентилятора приведена в работе [9].

В результате исследования скорости движения воздуха установлено, что при расположении КЭТО на расстоянии $1,5 D_B$ (D_B – диаметр лопастей потолочного вентилятора, м) от вертикальной оси подвеса потолочного вентилятора их взаимовлиянием на скорость движения воздуха в рабочей зоне и на конвективный теплообмен можно пренебречь. Скорость движения воздуха v_B в объеме отапливаемого

помещения при работе потолочного вентилятора показана на рисунке 6.

Интерполяционный полином зависимости распределения скорости воздуха в помещении при работающем вентиляторе имеет вид:

$$v_b = -0,006h_p^2 - 0,35h_p r + 0,57r^2 + 0,32h_p - 1,05r + 0,63. \quad (3)$$

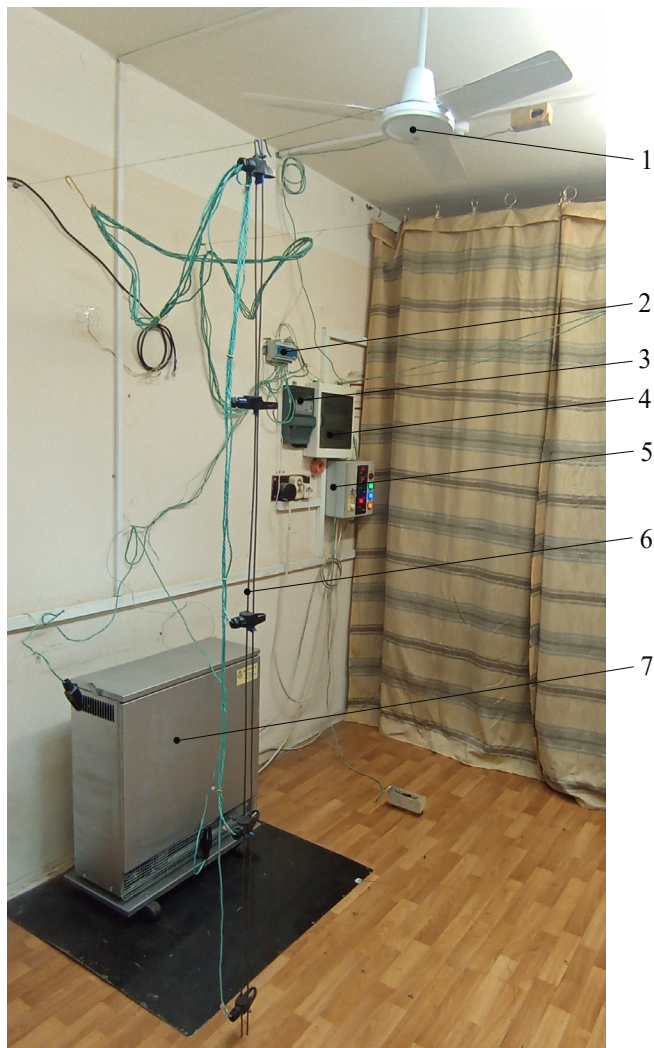


Рис. 4. Общий вид лабораторного стенда для исследования теплового режима помещения при совместной работе КЭТО и потолочного вентилятора:
1 – потолочный вентилятор; 2 – блок измерения (модуль ввода – аналоговый измерительный 8-канальный ОВЕН МВА8); 3 – электрический счетчик – трехфазный Меркурий 230; 4 – щит силовой; 5 – щит управления элементами системы электрообогрева; 6 – измерительная стойка; 7 – комбинированный ЭТО (физическая модель)

Fig. 4. General view of the laboratory bench for studying the thermal conditions of premises during combined operation of the CETSH unit and a ceiling fan:

1 – ceiling fan; 2 – measurement unit: OVEN MVA88-channel analog input module; 3 – Mercury 230 three-phase electric meter; 4 – power panel; 5 – control panel for the electric heating system elements; 6 – measuring rack; 7 – CETSH unit (physical model)

При совместной работе КЭТО с потолочным вентилятором скорость движения воздуха в рабочей зоне помещения составляет не более $0,2 \dots 0,4$ м/с, что не превышает нормативных значений².

Режим автоматического поддержания температуры воздуха в рабочей зоне помещения при работе

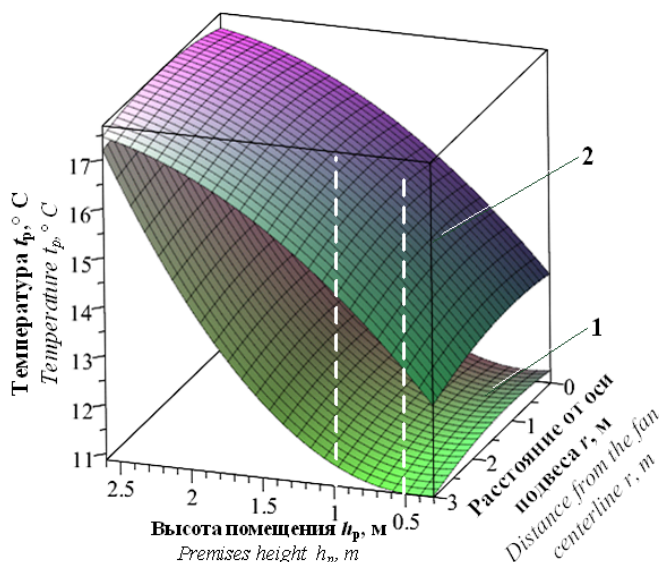


Рис. 5. Распределение температуры воздуха в помещении по высоте h_p с учетом расстояния от оси подвеса вентилятора r :
1 – при выключенном потолочном вентиляторе, 2 – при работающем вентиляторе

Fig. 5. Distribution of air temperature by premises height h_p and distance from the fan centerline r :
1 – with the ceiling fan in the OFF-position, 2 – with the ceiling fan in the ON-position

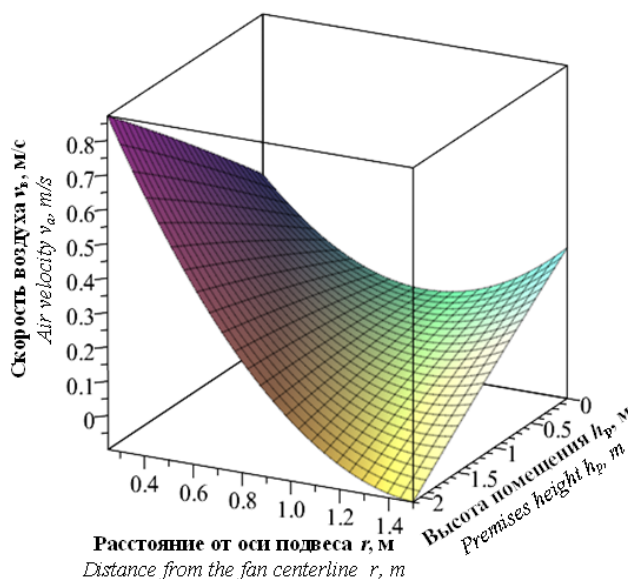


Рис. 6. Скорость движения воздуха v_b в объеме исследуемого помещения при работе потолочного вентилятора

Fig. 6. Air velocity in the test premises volume during ceiling fan operation

КЭТО и потолочного вентилятора показан на графиках рисунка 7. Температура воздуха в рабочей зоне задана как $t_{p.z.} = 21 \pm 1^\circ\text{C}$ (t_2). При значении ниже 20°C включается КЭТО (рис. 7). При невозможности поддержания заданной температуры воздуха КЭТО в вечернее и ночное время, а также в случае снижения температуры ниже установленной (в нашем

примере – $19,5^\circ\text{C}$) включается встроенный калорифер КЭТО для подогрева воздуха до заданного значения. При превышении разницы температуры воздуха у потолка и пола Δt (рис. 8) более установленного значения (в нашем случае $\Delta t = 1,5 \pm 0,5^\circ\text{C}$) автоматически включается потолочный вентилятор для выравнивания температуры по высоте помещения.

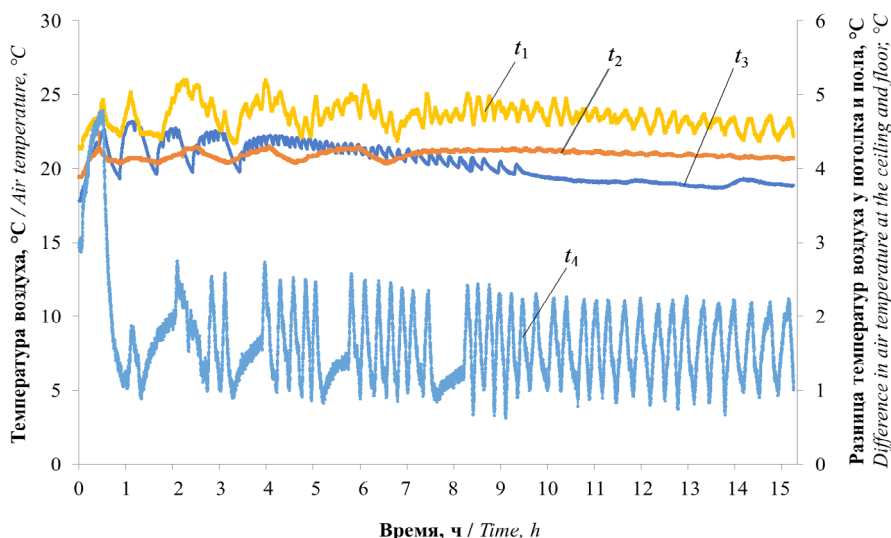


Рис. 7. График изменения температуры воздуха в помещении при автоматическом регулировании:

t_1 – температура воздуха у потолка, $^\circ\text{C}$; t_2 – температура воздуха в рабочей зоне, $^\circ\text{C}$;
 t_3 – температура воздуха у пола, $^\circ\text{C}$; t_4 – разность температур воздуха у потолка и у пола, $^\circ\text{C}$

Fig. 7. Graph of air temperature variation in the room under automatic control:

t_1 – air temperature near the ceiling, $^\circ\text{C}$; t_2 – air temperature in the working area, $^\circ\text{C}$;
 t_3 – air temperature near the floor, $^\circ\text{C}$; t_4 – air temperature difference between the ceiling and the floor, $^\circ\text{C}$

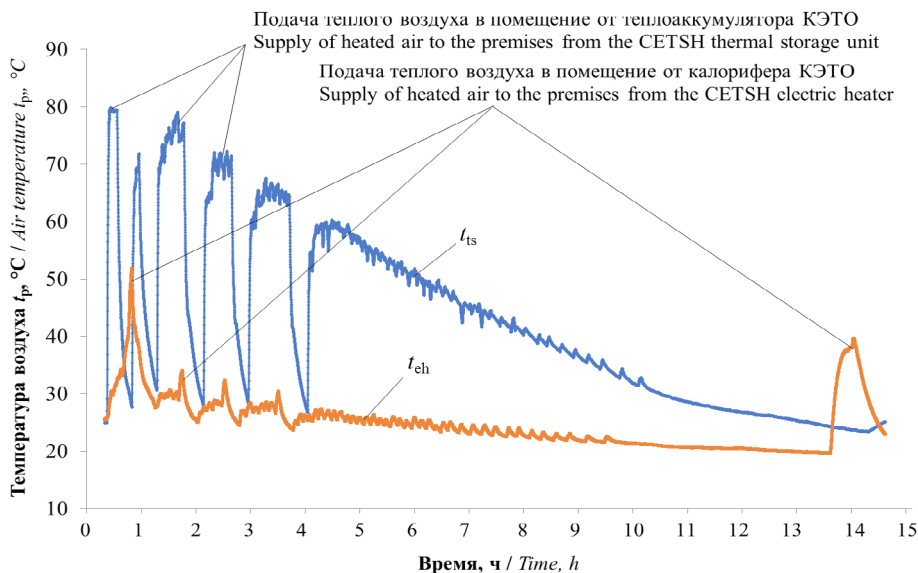


Рис. 8. Температура воздуха на выходе из КЭТО:

t_{ts} – температура воздуха, выходящего из теплоаккумуляционного блока КЭТО;
 t_{ch} – температура воздуха, выходящего из калорифера КЭТО

Fig. 8. Air temperatures at the CETSH outlet:

t_{ts} – air temperature at the outlet of the CETSH thermal storage unit; t_{ch} – air temperature at the outlet of the CETSH electric heater

²РД-АПК 1.10.01.01-18. Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота. М.: Минсельхоз России, 2018.

В результате экспериментальных исследований установлено, что совместная работа КЭТО и потолочного вентилятора позволяет поддерживать требуемые температурные условия в зоне размещения животных. При этом скорость движения воздуха в рабочей зоне не превышает нормативных значений.

Выводы

1. Разработанный комбинированный электрический теплоаккумуляционный обогреватель (КЭТО), состоящий из аккумуляционного блока и блока прямого нагрева, способен работать по временному графику выработки тепловой энергии (периодического действия) и обеспечивать нормативные значения температуры воздуха в животноводческих помещениях.

2. При совместной работе КЭТО с потолочным вентилятором температура воздуха в рабочей зоне отапливаемого помещения повышается на 2...3°C. Энергосберегающий эффект достигается за счет

направления потолочным вентилятором теплого воздуха, скапливающегося у потолка, в рабочую зону помещения. По предварительной оценке, за счет этого можно снизить мощность электрической системы обогрева не менее чем на 15%.

3. Совместная работа КЭТО и потолочного вентилятора позволяет поддерживать необходимый температурный режим в животноводческом помещении при обеспечении скорости движения воздуха в рабочей зоне не более 0,2...0,4 м/с, не превышающей нормативных значений.

4. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку имитационной компьютерной модели животноводческого помещения при обогреве КЭТО с потолочным вентилятором. Планируется также проведение натурных испытаний для оценки влияния комбинированной системы электротеплоаккумуляционного обогрева на концентрацию вредных выделений в зоне расположения животных.

Список источников

1. 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>
2. Новиков Н.Н. Энергоэффективные системы микроклимата в помещениях для содержания животных // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. 2018. № 4. С. 159-167. EDN: MNVDZB
3. Новиков Н.Н., Кольчик И.Е. Кондиционирование воздуха в животноводческих помещениях при нестационарной вентиляции // Техника и технологии в животноводстве. 2021. № 1. С. 52-58. EDN: RQXZTK
4. Flood Jr C.A., Koon J.L., Trumbull R.D. et al. Energy savings with ceiling fans in broiler houses. *Applied Engineering in Agriculture*. 1998;14(3):305-309
5. Liu Sh., Lipczynska A., Schiavon S. et al. Detailed experimental investigation of air speed field induced by ceiling fans. *Building and Environment*. 2018;142:342-360. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.06.037>
6. Raftery P., Fizer J., Chen W. et al. Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. *Building and Environment*. 2019;155:210-223. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.03.040>
7. Omrani S., Matour S., Bamdad K. et al. Ceiling fans as ventilation assisting devices in buildings: A critical review. *Building and Environment*. 2021;201:108010. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108010>
8. Li W., Chong A., Hasama T. et al. Effects of ceiling fans on airborne transmission in an air-conditioned space. *Building and Environment*. 2021;198:107887. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107887>
9. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S. et al. Electric heating system with thermal storage units and ceiling fans for cattle-breeding farms. *Agriculture*. 2022;12(11):1753. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111753>
10. Трунов С.С., Растимешин С.А. Экономия энергии при использовании потолочных вентиляторов в животноводческих

References

1. 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>
2. Novikov N.N. Energy-efficient indoor climate systems in animal keeping premises. *Vestnik Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhanizatsii zhivotnovodstva*. 2018;4:159-167. (In Russ.)
3. Novikov N.N., Kolchik I.E. Air conditioning in livestock buildings with temporary ventilation. *Machinery and Technologies in Livestock*. 2021;1:52-58 (In Russ.). <https://doi.org/10.51794/27132064-2021-1-52>
4. Flood Jr, C. A., Koon J.L., Trumbull R.D. et al. Energy savings with ceiling fans in broiler houses. *Applied Engineering in Agriculture*. 1998;14(3):305-309.
5. Liu Sh., Lipczynska A., Schiavon S. et al. Detailed experimental investigation of air speed field induced by ceiling fans. *Building and Environment*. 2018;142:342-360. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.06.037>
6. Raftery P., Fizer J., Chen W. et al. Ceiling fans: Predicting indoor air speeds based on full scale laboratory measurements. *Building and Environment*. 2019;155:210-223. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.03.040>
7. Omrani S., Matour S., Bamdad K. et al.: Ceiling fans as ventilation assisting devices in buildings: A critical review. *Building and Environment*. 2021;201:108010. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108010>
8. Li W., Chong A., Hasama T. et al. Effects of ceiling fans on airborne transmission in an air-conditioned space. *Building and Environment*. 2021;198:107887. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107887>
9. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S. et al. Electric heating system with thermal storage units and ceiling fans for cattle-breeding farms. *Agriculture*. 2022;12(11):1753. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111753>
10. Trunov S.S., Rastimeshin S.A. Energy savings when using ceiling fans in livestock premises. *Vestnik VIESKH*. 2016;3:35-37. (In Russ.)

помещениях // Вестник ВИЭСХ. 2016. № 3. С. 35-37. EDN: WWWVCZ

11. Тихомиров Д.А., Трунов С.С., Дудин С.Н. Теплоаккумуляционная электроустановка для нагрева воздуха // Сельский механизатор. 2019. № 8. С. 31-33. EDN: YRDHZG

12. Трунов С.С., Хименко А.В., Тихомиров Д.А. Электрическая теплоаккумуляционная отопительная установка для животноводческих помещений // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, № 4. С. 73-81. EDN: BDEVPD

13. Zhao H., Yan N., Xing Z. et al. Thermal calculation and experimental investigation of electric heating and solid thermal storage system. *Energies*. 2020;13(20):5241. <https://doi.org/10.3390/en13205241>

14. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. et al. Thermal characteristics and operation efficiency of solid-state electro thermal storage. *Energy Reports*. 2021;7(5):219-231. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.129>

15. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. Experimental studies of the thermal characteristics of electro-thermal storage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;839:052058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052058>

16. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S., Kuzmichov A. Theoretical studies of the thermal state of heat storage elements of the electric thermal storage in the modes of charging and heat output. *E3S Web of conferences*. 2021;254:07010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125407010>

17. Трунов С.С., Дудин С.Н. Определение оптимальной доли использования теплоаккумуляторов в общем энергобалансе электротепловых установок фермы // Вестник ВИЭСХ. 2017. № 4. С. 13-20. EDN: VVWXR

18. Дудин С.Н., Тихомиров Д.А. Энергоэффективная аккумуляционная электроустановка для нагрева воздуха // Молодая наука аграрного Дона: традиции, опыт, инновации. 2018. № 2-2. С. 200-206. EDN: YOLRBZ

Информация об авторах

¹Тихомиров Дмитрий Анатольевич, член-корр. РАН, д-р техн. наук, главный научный сотрудник; tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>; SPIN-код: 9409-8655

²Хименко Алексей Викторович, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; avmkh87@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2612-969X>; SPIN-код: 1476-8640

³Кузьмичев Алексей Васильевич, научный сотрудник; alkumkuzm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4655-6448>; SPIN-код: 6773-5432

^{1, 2, 3}Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

Тихомиров Д.А. – концептуализация, руководство исследованиями, верификация данных, создание черновика рукописи; Хименко А.В. – методология, проведение исследований, визуализация, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование;

Кузьмичев А.В. – программное обеспечение, формальный анализ.

Конфликт интересов

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

Статья поступила 11.03.2026; после рецензирования и доработки 07.07.2026; принята к публикации 09.07.2026

11. Tikhomirov D.A., Trunov S.S., Dudin S.N. Heat storage installation for air heating. *Selskiy Mekhanizator*. 2019;8:31-33. (In Russ.)

12. Trunov S.S., Khimenko A.V., Tikhomirov D.A. Electric heat storage heating plant for livestock premises. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2024;71(4):73-81 (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2024-71-4-73-81>

13. Zhao H., Yan N., Xing Z. et al. Thermal calculation and experimental investigation of electric heating and solid thermal storage system. *Energies*. 2020;13(20):5241. <https://doi.org/10.3390/en13205241>

14. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. et al. Thermal characteristics and operation efficiency of solid-state electro thermal storage. *Energy Reports*, 2021;7S5:219-231. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.07.129>

15. Khimenko A.V., Tikhomirov D.A., Kuzmichev A.V. Experimental studies of the thermal characteristics of electro-thermal storage. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021;839:052058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/5/052058>

16. Khimenko A., Tikhomirov D., Trunov S., Kuzmichov A. Theoretical studies of the thermal state of heat storage elements of the electric thermal storage in the modes of charging and heat output. *E3S Web of Conferences*, 2021;254:07010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125407010>

17. Trunov S.S., Dudin S.N. Determining the optimal share of heat storages in the overall energy balance of farm electric thermal installations. *Vestni VIESH*. 2017;4:13-20 (In Russ.)

18. Dudin S.N., Tikhomirov D.A. Energy-efficient storage electric installation for air heating. *Molodaya nauka agrarnogo Dona: traditsii, opyt, innovatsii*. 2018;2-2:200-206. (In Russ.)

Author Information

Dmitriy A. Tikhomirov¹, RAS Corresponding Member, DSc (Eng), Chief Research Engineer; tihda@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3526-4474>

Aleksei V. Khimenko², PhD (Eng), Lead Research Engineer; avmkh87@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2612-969X>

Aleksey V. Kuzmichev³, Research Engineer; alkumkuzm@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4655-6448>

^{1, 2, 3} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutsky Proezd Str., 5

Author Contributions

D.A. Tikhomirov – conceptualization, research supervision, data curation, writing – original draft;

A.V. Khimenko – methodology, investigation, visualization, writing – review and editing of the manuscript;

A.V. Kuzmichev – software, formal analysis.

Conflict of interests

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

Received 11.03.2026; Revised 07.07.2026; Accepted 09.07.2026