

Использование испарительного охлаждения для повышения продуктивности животноводческих ферм

Рецензия эксперта на статью получена 20.12.2024 [The expert review of the article was received on December 20, 2024]

Зависимость удоев молока от микроклимата

Животноводческие помещения для содержания крупного рогатого скота должны быть оборудованы вентиляцией, исходя из требуемых расчётных параметров внутреннего воздуха. По данным [1], нарушение теплового режима негативно влияет на проявлении жизненных функций коров. Реакция коров на температуру, влажность и подвижность воздуха зависит от возраста, породы, кормления, продуктивности, степени приспособленности, сезона и погодных условий (рис. 1).

Влажность воздуха в животноводческих помещениях играет важную роль в создании комфортных условий для содержания коров. Оптимальный уровень влажности способствует поддержанию здоровья животных, их продуктивности и репродуктивной функции. Повышение влажности более 80 % может привести к негативным последствиям. При высокой влажности воздуха обмен веществ у коров

замедляется, окислительно-восстановительные процессы нарушаются. Это приводит к снижению аппетита, ухудшению усвояемости кормов и, как следствие, к уменьшению продуктивности. Кроме того, повышается заболеваемость и отбраковка коров, особенно молодняка, который более чувствителен к сквознякам.

Зависимость параметров наружного воздуха от широты

Мощность солнечного излучения, поступающего на Землю в определённой местности, зависит от географической широты. Она определяет полуденную высоту Солнца и продолжительность излучения, то есть широта влияет и на температуру воздуха. В европейской части России преобладает умеренно-континентальный климат. Он является одним из продуктивных для сельского хозяйства благодаря условиям для скотоводства.

Зависимость температуры от широты местности в июле показана на рис. 2.

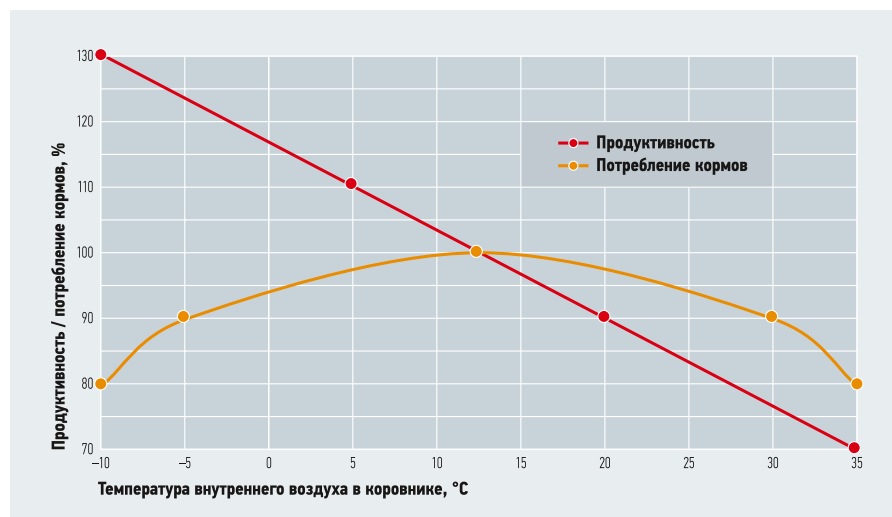


Рис. 1. Зависимость потребления пищи животными и их молочной продуктивности от температуры внутреннего воздуха в коровнике

УДК 636.2.034. Научная специальность: 2.4.5.

Использование испарительного охлаждения для повышения продуктивности животноводческих ферм

М. Ю. Егоров, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ «МЭИ»); **А. О. Кривицкий**, аспирант, НИУ «МЭИ»; **Н. Б. Демидова**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (СПб ГУАП)

Рассмотрена задача поддержания климата животноводческих молочных ферм. Коровы подвержены стрессу при температуре воздуха выше +24 °C и влажности более 50 %. Молочная продуктивность падает до 35 %. Для поддержания условий выбрано испарительное охлаждение. Представлены методы оценки микроклимата, создаваемого системой охлаждения кассетного типа. Показаны её преимущества. Построена зависимость роста удоев молока от широты местности европейской части РФ для фермы крупного рогатого скота на 250 голов.

Ключевые слова: сельское хозяйство, агропромышленный комплекс, животноводческие молочные фермы, содержание крупного рогатого скота, микроклимат, испарительное охлаждение, продуктивность ферм, зависимость удоев от широты местности.

UDC 636.2.034. Scientific specialty number: 2.4.5.

The use of evaporative cooling to increase the productivity of livestock farms

M. Yu. Egorov, PhD, Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **A. O. Krivitsky**, postgraduated student, NRU "MPEI"; **N. B. Demidova**, PhD student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SPb SUAI)

The problem of maintaining the climate of livestock dairy farms is considered. Cows are stressed when the air temperature is above +24 °C and humidity is more than 50 %. Dairy productivity drops to 35 %. Evaporative cooling is selected to maintain the conditions. Methods for assessing the microclimate created by a cassette-type cooling system are presented. Its advantages are shown. The dependence of milk yield growth on the latitude of the terrain of the European part of the Russian Federation for a 250-head cattle farm is constructed.

Key words: agriculture, agro-industrial complex, livestock dairy farms, cattle maintenance, microclimate, evaporative cooling, farm productivity, dependence of milk yields on the latitude of the area.

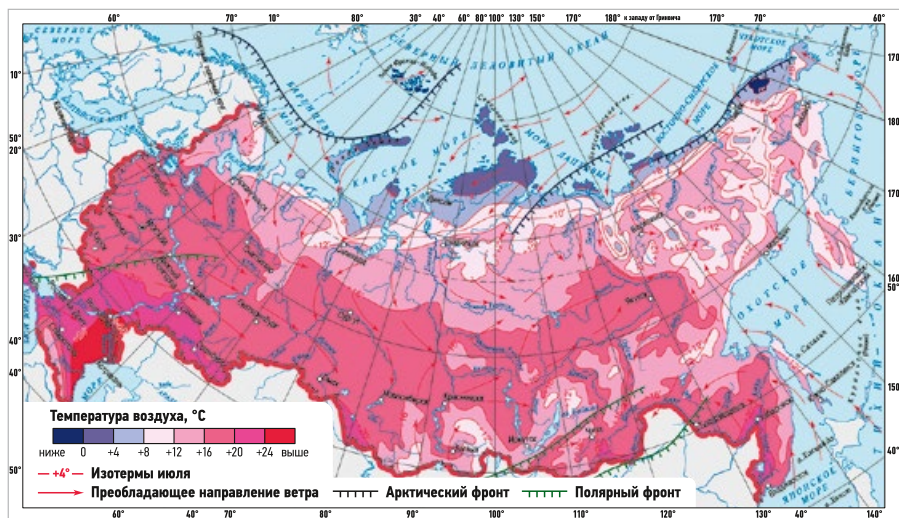


Рис. 2. Средние температуры воздуха и преобладающие направления ветров в июле в РФ

Способы охлаждения воздуха в животноводческом помещении

Для достижения параметров микроклимата используются различные методы. Пассивные методы направлены на снижение теплоступлений в помещения от солнца через ограждающие конструкции. К активным относят действия, направленные на вентиляцию помещения без охлаждения или с охлаждением приточного воздуха, в зависимости от климатических условий, на охлаждение воздуха от установок, расположенных непосредственно внутри помещений содержания животных.

Рассмотрим имеющиеся на рынке системы с охлаждением воздуха:

1. Системы с использованием кассет. Испарительные охладители с использованием кассет являются эффективными аппаратами со стороны степени охлаждения и энергоэффективности, а также простыми по исполнению. Воздух, подаваемый в здания, проходит через смоченные водой кассеты, которые располагаются на стенах здания. Они могут изготавливаться из различных материалов, таких как гофрированная бумага, различного рода губки, ткани, образующих большую площадь соприкосновения воздуха со смоченной поверхностью, чтобы увеличить эффективность испарения, а следовательно, и обеспечить снижение температуры воздуха. Принцип действия систем с использованием кассет показан на рис. 3.

2. Модульные охладители. Их монтируют на наружных стенах здания. Модульные охладители не нуждаются в больших стеновых проёмах, легко встраиваются в действующую систему вентиляции. Конструктивно они представляют собой устройства, в которых совмещены две функции: вентиляция и охлаждение.

3. Центробежные охладители. Вода подаётся из сети центрального водоснабжения по пластиковым трубам в бак оперативного запаса. Уровень воды в баке регулируется поплавковым клапаном. Из бака

вода насосом подаётся на вращающийся диск, приводимый в движение электромотором. Соосно с первым электромотором расположен второй, который вращает лопасти вентилятора, создавая поток движения воздуха. Воздух проходит внутри корпуса охладителя, подхватывает распылённые капли воды и разносит их по помещению. Вода разбрасывается вращающимся диском под действием центробежных сил и превращается в мелкодисперсный аэрозоль (размер частиц 20–60 мкм). Мелкие капли, встречаясь с сухим потоком воздуха, испаряются, охлаждая воздух. Далее охлаждённый воздух поступает в зону обитания животных.

4. Системы форсуночного распыления. Используются в помещениях, для которых характерна не только высокая температура, но и низкая влажность. Они размещаются высоко над животными, чтобы по мере распыления капли воды испарялись в воздухе. Мелкие капельки воды распыляются в помещении с помощью форсунок под высоким давлением, что способствует уменьшению температуры и не приводит к значительному увеличению влажности. Снижение температуры в помещении составляет не более 5°C.

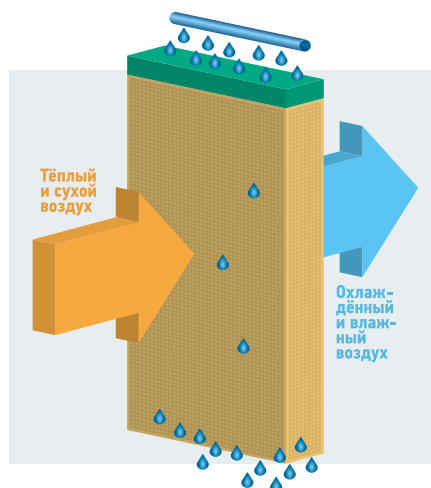


Рис. 3. Принцип действия испарительного охладителя с использованием кассеты

Методы расчёта Расчёт системы вентиляции в летний период

Тепловыделения [кВт] от животных в тёплый период:

$$\Phi = \Phi_{\text{ж}} n_{\text{ж}} q_{\text{ж}}^{\text{общ}} \beta_t, \quad (1)$$

где $n_{\text{ж}}$ — количество животных, находящихся в помещении, голов; $q_{\text{ж}}^{\text{общ}}$ — норма тепловыделения выделения, Вт [2]; β_t — поправка на зависимость тепловыделений животных от температуры воздуха внутри помещения. Для определения коэффициента β_t нужно определить температуру воздуха [°C] внутри помещения:

$$t_{\text{в}} = t_{\text{н}} + 5, \quad (2)$$

где $t_{\text{н}}$ — температура наружного воздуха [°C] обеспеченностью 0,95 для определённого региона [3]. Тепловыделения от технологического оборудования [кВт] представляют собой сумму:

$$\Phi_{\text{то}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{уст.}i} (1 - \eta_{\text{э}}) \eta_{\text{и}} \eta_{\text{з}} \eta_{\text{о}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{уст.}i}$ — установленная мощность для привода электродвигателей i -го типа, кВт; $\eta_{\text{э}}$ — КПД электродвигателей; $\eta_{\text{и}}$ — коэффициент использования установленной мощности, $\eta_{\text{и}} = 0,75-0,90$; $\eta_{\text{з}}$ — коэффициент загрузки оборудования в течение суток, $\eta_{\text{з}} = 0,5-0,8$; $\eta_{\text{о}}$ — коэффициент одновременности работы электродвигателей, $\eta_{\text{о}} = 0,6-0,95$.

Термическое сопротивление покрытия теплопередаче [м²·К/Вт] представляет собой сумму элементов:

$$R_0 = \sum_{i=1}^m R_{\text{п.}i} = \sum_{i=1}^m \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4)$$

здесь $R_{\text{п.}i}$ — термическое сопротивление i -го слоя, $R_{\text{п.}i} = \delta_i / \lambda_i$, м²·К/Вт, где δ_i — толщина i -го слоя, м; λ_i — коэффициент теплопроводности i -го слоя, Вт/(м·К).

Теплоступления от солнечной радиации [Вт]:

$$\Phi_{\text{р}} = \Phi_{\text{р.п}} + \Phi_{\text{р.ост}} = K_1 \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{R_0} A_{\text{п}} + K_{\text{ост}} q_{\text{ост}} A_{\text{ост}}, \quad (5)$$

где $\Phi_{\text{р.п}}$ и $\Phi_{\text{р.ост}}$ — тепловой поток солнечной радиации через перекрытие и остекление, Вт; K_1 — поправочный коэффициент, $K_1 = 1,0$ — для бесчердачных помещений и $K_1 = 0,75$ — для чердачных; Δt_1 — эквивалентная разность температур, зависящая от географической широты местности; Δt_2 — эквивалентная разность температур, зависящая от конструкции перекрытия, цвета его наружной поверхности и географической широты местности; R_0 — общее термическое сопротивление перекрытия, м²·К/Вт; $A_{\text{п}}$ — площадь горизонтальной проекции перекрытия, м²; $K_{\text{ост}}$ — коэффициент,

зависящий от типа остекления; $q_{\text{ост}}$ — плотность радиационного потока, зависящая от географической широты местности и стороны света, к которой обращено остекление; $A_{\text{ост}}$ — площадь поверхности остекления, м².

Тепловые избытки [кВт] в тёплый период [4] определяются как сумма:

$$\Phi_{\text{изб}}^{\text{общ}} = \Phi_{\text{ж}} + \Phi_{\text{т.о}} + \Phi_{\text{р}}. \quad (6)$$

Расчётная норма относительной влажности воздуха внутри помещения: максимальная — 75 %, минимальная — 40 %. Влаговыделения с квадратного метра смоченной и свободной поверхности в час определяются графически [4].

Количество влаги [г/ч], испаряемой со свободной поверхности:

$$W_{\text{св.п}} = \omega_{\text{св.п}} A_{\text{св.п}}, \quad (7)$$

где $\omega_{\text{св.п}}$ — количество влаги, испаряемой с 1 м² свободной поверхности в единицу времени, г/(м²·ч); $A_{\text{св.п}}$ — площадь свободной поверхности, м².

Количество влаги [г/ч], испаряемой со смоченной поверхности:

$$W_{\text{см.п}} = \omega_{\text{см.п}} A_{\text{см.п}}, \quad (8)$$

где $\omega_{\text{см.п}}$ — количество влаги, испаряемой с 1 м² смоченной поверхности в единицу времени, г/(м²·ч); $A_{\text{см.п}}$ — площадь смоченной поверхности, м².

Количество водяных паров [г/ч], выделяемых животными:

$$W_{\text{ж}} = n_{\text{ж}} \omega_{\text{ж}} \beta_{\text{w}}, \quad (9)$$

где $\omega_{\text{ж}}$ — выделение влаги одним животным, кг; β_{w} — коэффициент, учитывающий изменение количества выделяемого водяного пара в зависимости от температуры воздуха в помещении.

Общее количество водяных паров W [кг/с], поступающих в животноводческое помещение:

$$W = W_{\text{ж}} + W_{\text{св.п}} + W_{\text{см.п}}. \quad (10)$$

Поступления в помещения углекислого газа [л/с]:

$$m'_{\text{CO}_2} = n_{\text{ж}} V_{\text{ж}} \beta_{\text{CO}_2}, \quad (11)$$

где $V_{\text{ж}}$ — норма выделения углекислого газа одной головой КРС, л/ч; β_{CO_2} — коэффициент для расчёта выделений животными при расчётной температуре внутри помещения [2].

Объёмный расход воздуха [м³/с] по нормируемому удельному расходу приточного воздуха:

$$V_{\text{н.уд}} = N m, \quad (12)$$

где N — живая масса животных, ц; m — нормируемый удельный расход приточного воздуха на 1 ц массы животных, равный 15 м³/ч.

Массовый расход воздуха [кг/с] по нормируемому удельному расходу приточного воздуха:

$$L_{\text{н.уд}} = V_{\text{н.уд}} \rho_2, \quad (13)$$

где ρ_2 — плотность воздуха внутри помещения, кг/м³.

Массовый расход воздуха, необходимый для удаления CO₂:

$$L_{\text{CO}_2} = \frac{m'_{\text{CO}_2}}{\frac{C_2}{\rho_2} - \frac{C_1}{\rho_1}}, \quad (14)$$

где C_1 — концентрация углекислого газа в воздухе, равная 0,3 л/м³; C_2 — допустимая концентрация CO₂ внутри помещения, равная 2,5 л/м³; ρ_1 — плотность приточного воздуха, кг/м³; ρ_2 — плотность воздуха внутри помещения, кг/м³. Массовый расход воздуха, необходимый для удаления избыточной теплоты и влаги:

$$L_{W,\Phi} = \frac{W}{d_2 - d_1}, \quad (15)$$

где d_1 и d_2 — влагосодержания приточного воздуха и воздуха внутри помещения, соответственно, кг вл/кг.

Расчёт системы испарительного охлаждения фермы

Для равномерного охлаждения помещения, расположим в помещении четыре испарительных охладителя. Расход воздуха [кг/с] для каждого аппарата:

$$V_{1a} = V/4, \quad (16)$$

где V — общий расход воздуха по летнему периоду. Парциальное давление пара:

$$p_{\text{п}} = p_{\text{с}} = \Phi p_{\text{нас}} \text{ [кПа]}, \quad (17)$$

где Φ — относительная влажность, %; $p_{\text{нас}}$ — давление насыщенного воздуха, кПа (определяется по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [5]).

Скорость воздуха, выходящего из испарителя-охладителя:

$$v_{1a} = \frac{V_{1a}}{F \rho_{\text{в}}}, \quad (18)$$

где F — площадь отверстия для выхода воздуха из аппарата, м²; $\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха, кг/м³.

Критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{v_{1a} l \rho_{\text{в}}}{\mu_{\text{в}}}, \quad (19)$$

где $\mu_{\text{в}}$ — динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Критерий Гухмана:

$$Gu = \frac{t_{\text{с}} - t_{\text{м}}}{t_{\text{с}}}, \quad (20)$$

где $t_{\text{с}}$ — температура воздуха, поступающего с улицы, К; $t_{\text{м}}$ — температура мокрого термометра, К.

По формуле А.В. Нестеренко [6] найдём критерий Нуссельта для случая испарения жидкости с плоской поверхности при вынужденном движении влажного газа:

$$Nu_{\text{м}} = A Re^m Pr_{\text{м}}^{0,33} Gu^{0,185}, \quad (21)$$

где $Pr_{\text{м}}$ — число Прандтля; A и m — постоянные, зависящие от величины критерия Рейнольдса.

Коэффициент диффузии [м²/с] определяется по [6]:

$$D = D_0 \frac{p_0}{p} \left(\frac{t_{\text{м}}}{t_0} \right)^{1,5}, \quad (22)$$

где D_0 — коэффициент диффузии для водяного пара при нормальных условиях, м²/с.

Коэффициент массоотдачи [м/с], отнесённый к разности концентраций пара:

$$\beta_{\text{с}} = \frac{Nu_{\text{м}} D}{l}. \quad (23)$$

Коэффициент массовой отдачи [кг/(м²·Па·с)], отнесённый к разности парциальных давлений:

$$\beta_{\text{р}} = \frac{\beta_{\text{с}}}{R_{\text{п}} t_{\text{с}}}, \quad (24)$$

где $R_{\text{п}}$ — газовая постоянная водяного пара, кДж/(кг·°С).

Количество влаги [кг/(м²·с)], испаряемое с 1 м² испарителя-охладителя [7]:

$$i = \frac{\beta_{\text{с}}}{C_{\text{в.п}} - C_{\text{с}}} = \frac{\beta_{\text{р}}}{p_{\text{м.т}} - p_{\text{с}}}, \quad (25)$$

где $C_{\text{в.п}}$ — концентрация влажного пара; $C_{\text{с}}$ — концентрация воздуха, поступающего в помещение. Количество влаги [кг вл/кг], проходящей через аппарат:

$$M = V_{1a} \Delta d, \quad (26)$$

где Δd — разность влагосодержания воздуха до и после аппарата, кг вл/кг.

Требуемая площадь испарения [м²] одного аппарата:

$$F_{\text{исп}} = M/i. \quad (27)$$

Расчёт увеличения удоев молока за счёт внедрения системы испарительного охлаждения

Расчёт увеличения удоев молока начинается с анализа статистических данных температуры окружающего воздуха для определения количества дней $N_{\text{днев}}$, при которых целесообразно использовать систему испарительного охлаждения.

Далее определяется производительность фермы в базовом режиме P_6 [%] при температуре воздуха внутри помещения и производительность при температуре мокрого термометра после внедрения системы испарительного охлаждения $P_{\text{охл}}$ [%] для конкретного региона.

Затем проводится расчёт количества молока [л], которое получится за $N_{\text{днев}}$ при охлаждении помещения:

$$Q_{\text{охл}} = Q_{1\text{к}} n_{\text{ж}} (P_{\text{охл}} - P_6) N_{\text{днев}}, \quad (28)$$

где $Q_{1\text{к}}$ — количество молока, производимого одной коровой в сутки, л/сут.

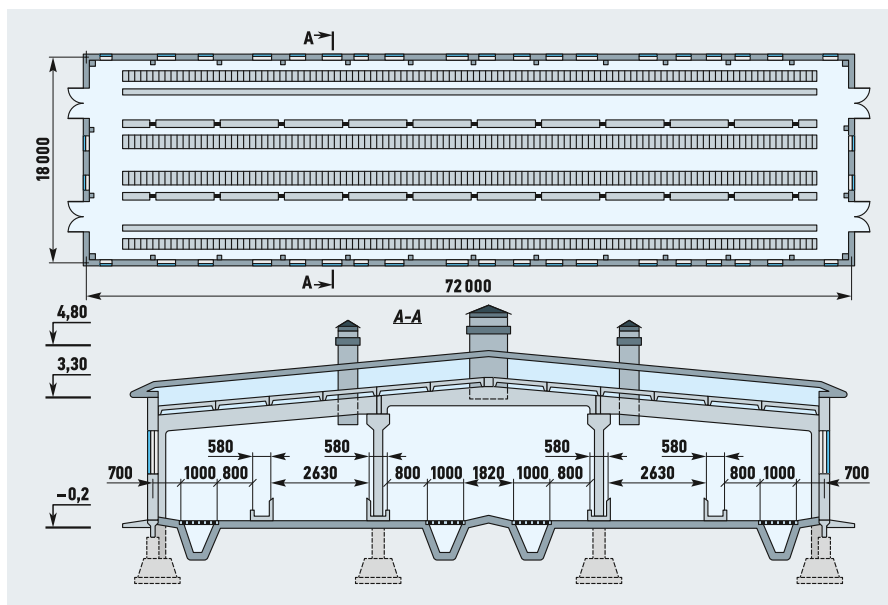


Рис. 4. Схема рассматриваемого здания коровника (1 — кормовой проход; 2 — кормушка; 3 — стойло; 4 — решётка; 5 — навозный проход; 6 — вытяжная шахта; 7 — навозный канал)

Анализ влияния широты местности на испарительное охлаждение

Для исследования рассмотрен типовой коровник на 250 голов, габаритные размеры строения (д × ш) — 72 × 18 м (рис. 4). Проект данного коровника анализировался для климатических условий четырёх регионов России: Ростовской, Воронежской, Рязанской и Тверской областей. Средняя масса крупного рогатого скота — 500 кг. Тип животного — коровы молочные породы, средний удой молока составляет 20 л/сут. Содержание — стойловое.

Здание — бесчердачное, одноэтажное, прямоугольной формы, высота боковых стен составляет 3,3 м, высота до конька крыши — 4,8 м. Несущие стены — пенобетон [$\delta_k = 0,420$ м, $\lambda_k = 0,43$ Вт/(м·К)], покрыты цементно-песчаной штукатуркой внутри [$\delta_k = 0,015$ м, $\lambda_k = 0,93$ Вт/(м·К)] и снаружи [$\delta_k = 0,020$ м, $\lambda_k = 0,93$ Вт/(м·К)]. Покрытие — железобетонные плиты [$\delta_k = 0,11$ м, $\lambda_k = 2,04$ Вт/(м·К)]. Пароизоляция — слой рубероида [$\delta_k = 0,0015$ м, $\lambda_k = 0,17$ Вт/(м·К)] на битумной мастике [$\delta_k = 0,004$ м, $\lambda_k = 0,27$ Вт/(м·К)]. Утеплитель — строительный войлок [$\delta_k = 0,13$ м, $\lambda_k = 0,05$ Вт/(м·К)].

Выравнивающий слой — цементно-песчаный раствор [$\delta_k = 0,015$ м, $\lambda_k = 0,93$ Вт/(м·К)], сверху рубероид [$\delta_k = 0,0015$ м, $\lambda_k = 0,17$ Вт/(м·К)] на битумной мастике [$\delta_k = 0,004$ м, $\lambda_k = 0,27$ Вт/(м·К)]. Полы — деревянные щиты [$\delta_k = 0,02$ м, $\lambda_k = 0,35$ Вт/(м·К)], бетон [$\delta_k = 0,07$ м, $\lambda_k = 1,86$ Вт/(м·К)]. На каждой из продольных стен расположено 50 окон размерами (ш × в) 0,6 × 0,8 м, на торцах здания — по двое ворот размерами (ш × в) 2,4 × 2 м ($R_v = 0,42$ м²·К/Вт). Продольные стены здания ориентированы, соответственно, одна на юг, другая на север.

Результаты расчётов приведены в виде зависимости (рис. 5) увеличения удоев молока от широты местности при применении испарительного охлаждения.

С увеличением северной широты наблюдается снижение прироста надоев молока — в северных регионах климат более холодный и влажный, что негативно сказывается на здоровье и продуктивности коров

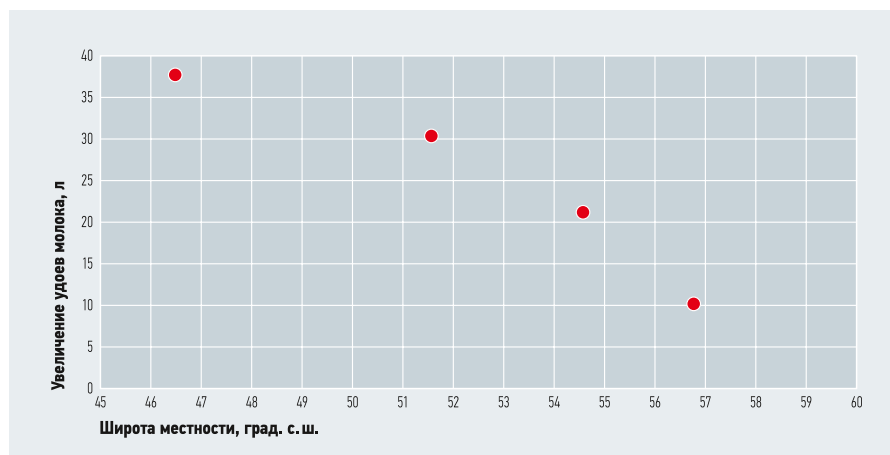


Рис. 5. Зависимость увеличения удоев молока от широты местности

Выводы

По результатам проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрены способы охлаждения воздуха в животноводческом помещении.
2. Представлен алгоритм расчёта летнего режима в животноводческом помещении, методика расчёта системы испарительного охлаждения кассетного типа, которая является эффективной для охлаждения помещений. Описан алгоритм оценки увеличения удоев молока за счёт внедрения системы испарительного охлаждения.
3. Проведены расчёты летних режимов животноводческих помещений, размещённых в различных регионах европейской части Российской Федерации:
 - Ростовской области (46,5° с.ш.);
 - Воронежской области (51,6° с.ш.);
 - Рязанской области (54,6° с.ш.);
 - Тверской области (56,8° с.ш.).

4. Проведены расчёты испарительных охладителей кассетного типа для типового коровника.

5. Увеличение удоев молока при применении систем испарительного охлаждения варьируется от 11 тыс. л молока в Тверской области до 52,5 тыс. л молока в Ростовской области. Показано, что с увеличением северной широты наблюдается снижение прироста надоев молока, поскольку в более северных регионах климат более холодный и влажный, что негативно сказывается на здоровье и продуктивности коров. В более южных широтах климат сухой и жаркий, то есть в таких условиях эффект испарительного охлаждения существенен, поскольку температура наружного воздуха выше, и её понижение даёт больший прирост надоев. В северных регионах, где климат более холодный и влажный, испарительное охлаждение даёт меньший эффект в увеличении надоев молока.

1. Гарькавый К.А. Исследования тепловлажного режима животноводческих помещений и разработка энергосберегающих мероприятий для обеспечения микроклимата: дисс. канд. техн. наук по спец. 05.23.03. — Ростов-на-Дону, 2003. 131 с.
2. РД-АПК 1.10.01.01–18. Методические рекомендации по технологическому проектированию ферм и комплексов крупного рогатого скота / Дата введ.: 01.09.2018.
3. СП 131.13330.2020. Строительная климатология [СНиП 23-01-99*] (с Изм. №1, 2) / Дата введ.: 25.06.2021.
4. Рудобашта С.П., Бабичева Е.Л. Теплоснабжение животноводческих помещений: учеб. пособие. — М.: Изд-во РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. 166 с.
5. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справ. — М.: Изд-во МЭИ, 1999. 168 с.
6. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твёрдой фазой. — М.: Химия, 1980. 248 с.
7. Рудобашта С.П., Ильяхин М.С., Сидоренков Ф.Т. Расчёт процессов сушки сельскохозяйственной продукции. — М.: Изд-во МИИСП, 1987. 106 с.

References — see pages 79.

The use of evaporative cooling to increase the productivity of livestock farms.
Pp. 40–43.

Mikhail Yu. Egorov, PhD, Associate Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (NRU "MPEI"); **Alexey O. Krivitsky**, postgraduated student, NRU "MPEI"; **Nina B. Demidova**, PhD student, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SPb SUAI)

1. K.A. Garkavy. *Issledovaniya teplovlazhnostnogo rezhima zhivotnovodcheskikh pomeshchenij i razrabotka jenergosberegajushchikh meroprijatij dlja obespechenija mikroklimata* [Research of heat and humidity conditions of livestock buildings and development of energy-saving measures to ensure microclimate]. *PhD dissertation in scientific specialty No. 05.23.03*. Rostov-on-Don. 2003. 131 p. [In Russian]
2. RD-APK 1.10.01.01–18 [The Guidance Document for the Agro-industrial Complex No. 1.10.01.01–18]. *Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologicheskomu proektirovaniju ferm i kompleksov krupnogo rogatogo skota* [Methodological recommendations for the technological design of farms and cattle complexes]. Date of impl.: September 1, 2018. [In Russian]
3. SP 131.13330.2020 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 131.13330.2020]. *Stroitel'naja klimatologija [SNiP 23-01-99*] (s Izm. No. 1, 2)* [Construction climatology {The Building Rules & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 23-01-99*} (with Amendments No. 1, 2)]. Date of impl.: June 25, 2021. [In Russian]
4. S.P. Rudobashta, E.L. Babicheva. *Teplosnabzhenie zhivotnovodcheskikh pomeshchenij: ucheb. posobie* [Heat supply for livestock buildings: A textbook]. Moscow. *Izd-vo RGAU-MSKhA im. K.A. Timirjazeva* [Publishing House of the Russian State Agricultural University]. 2019. 166 p. [In Russian]
5. A.A. Aleksandrov, B.A. Grigoriev. *Tablitsy teplofizicheskikh svojstv vody i vodjanogo para: sprav.* [Tables of thermophysical properties of water and water vapor: A reference book]. Moscow. *Izd-vo MPEI* [Publishing House of the Moscow Power Engineering Institute (NRU "MPEI")]. 1999. 168 p. [In Russian]
6. S.P. Rudobashta. *Massoperenos v sistemakh s tverdoj fazoj* [Mass transfer in systems with solid phase]. Moscow. *Khimija* ["The Chemistry" Publishers]. 1980. 248 p. [In Russian]
7. S.P. Rudobashta, M.S. Ilyukhin, F.T. Sidorenkov. *Raschet protsessov sushki sel'sko-khoz'jajstvennoj produkcii* [Calculation of drying processes of agricultural products]. Moscow. *Izd-vo MIISP* [Publishing House of the Moscow Institute of Agricultural Production Engineers]. 1987. 106 p. [In Russian]