

На правах рукописи

Герасимова Ольга Александровна

**ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ
ПАСТБИЩНОГО СОДЕРЖАНИЯ КОРОВ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ
ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОХЛАДИТЕЛЯ МОЛОКА**

Специальность 05.20.01 – Технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия»

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор
Шилин Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
- **Сечкин Василий Семенович**

кандидат технических наук, доцент
- **Гордеев Владислав Владимирович**

Ведущая организация – ГНУ Всероссийский научно-исследовательский институт механизации животноводства

Защита состоится « 16 » июня 2011 г. в 9 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 006.054.01 при Государственном научном учреждении «Северо-Западный научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук» по адресу: 196625, Санкт-Петербург, Тярлево, Фильтровское ш., 3, факс (812) 466-56-66

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии

Автореферат разослан « 12 » мая 2011 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Черей Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Пастбищный период в молочном животноводстве Псковской области, где под пастбищами заняты значительные неиспользуемые площади, считается реальным резервом снижения себестоимости производства молока в летний период.

Травы пастбищного периода в несколько раз дешевле других кормов, скот выпасается в течение 140 дней. Эти травы являются естественным кормом для коров. Нельзя не учитывать и того обстоятельства, что в 1 кг сухого вещества зеленой бобово-злаковой смеси содержится более 100г переваримого протеина, до 70 г сахара, 10...12 МДж обменной энергии, каротин, витамины Д, Е и др. Животные, находясь на свежем воздухе, укрепляют здоровье, улучшают воспроизводительные функции. Как правило, 60...70% годового надоя приходится на пастбищный период. Однако при производстве молока на пастбищных комплексах отсутствует эффективная технология, отвечающая конкретным условиям региона, не решена задача первичного охлаждения молока, в то время как своевременное и качественное охлаждение способствует снижению количества бактерий и, соответственно, повышению качества молока и продолжительности его хранения. В современных условиях хозяйственных отношений мало произвести молоко, важно сохранить его на более длительный срок для последующей переработки и реализации как продукта высокого качества. В условиях пастбищного содержания коров в летний период эти вопросы особенно актуальны, если учесть условия получения молока, хранения и транспортировки.

Работа выполнена в ФГОУ ВПО «Великолукская ГСХА» в соответствии с планом НИР на 2006-2011 гг. по региональным научно-техническим проектам по теме №7 «Энергосберегающие технологии и технические средства для механизированных процессов в животноводстве», и соответствует плану научных исследований РАСХН.

Цель исследований. Повышение эффективности производства молока за счет улучшения организации использования естественных пастбищ и обоснования энергосберегающей технологической линии с применением устройства для первичной обработки молока.

Исходя из поставленной цели, намечены следующие **задачи**:

- путем анализа современного состояния и обобщения результатов теоретических исследований повысить эффективность производства молока на пастбищных комплексах, обосновать его структуру, технологию непрерывного функционирования в режиме энергосбережения;
- разработать эффективные технологические процессы производства и охлаждения молока с использованием естественного холода, влияющие на повышение качества молока;
- на основании теоретических исследований обосновать конструктивные и технологические параметры охладителя молока, которые обеспечат

- максимальную производительность при минимальных энергозатратах;
- на основе математического моделирования технологических процессов охлаждения молока, а также результатов экспериментов, исследовать и установить рациональные конструктивные и технологические параметры охладителя молока с использованием естественного холода;
 - провести испытания охладителя молока в производственных условиях, установить экономическую эффективность результатов исследования и дать рекомендации производству.

Объект и предмет исследования. Организация пастбищного комплекса с установкой для первичного охлаждения молока естественным холодом.

Научная новизна. Разработаны: алгоритм достижения цели совершенствования технологических процессов при пастбищном содержании коров; экономико-математическая модель обоснования эффективности производства молока в летний период на основе пастбищного комплекса; разработка теории, позволяющей установить возможность эффективного использования природного холода для получения необходимой конечной температуры молока при его первичном охлаждении; разработке оптимального коэффициента, позволяющего получить более точные технологические и конструкционные параметры по отношению к устройству для первичного охлаждения молока с использованием естественного холода, применимого большей частью для условий пастбищ.

Практическая значимость. В результате проведенных исследований получена возможность внедрения технологической линии производства молока для пастбищного содержания коров при отсутствии централизованного электроснабжения. Разработанная технологическая линия и методы её расчета могут использоваться при создании пастбищных комплексов для содержания дойного поголовья КРС в летний период.

Основные положения, выносимые на защиту:

- обоснование необходимости развития пастбищных комплексов;
- теоретические предпосылки по обоснованию технологических и конструктивных параметров установки для первичного охлаждения молока;
- математические модели рабочего процесса установки;
- практические результаты выполненных исследований и их энергетическая и экономическая эффективность.

Реализация результатов. По результатам исследований в ФГОУ ВПО «Великолукская ГСХА» изготовлен опытный образец установки для первичного охлаждения молока естественным холодом производительностью 0,82 м³/ч по охлажденному молоку и – 1,8 м³/ч по охлажденной воде, которая прошла производственную проверку в ЗАО «Великолукское» Великолукского района Псковской области, что подтверждено соответствующими документами.

Апробация работы. Основные положения диссертации были доложены и одобрены: на конференции профессорско-преподавательского

состава С-ПбГАУ – 2007...2011гг., на научно-практических конференциях Великолукской ГСХА – 2007...2011 гг., на Международной научно-практической конференции молодых ученых НПЦ НАН Белоруссии по механизации сельского хозяйства, Минск, 25...26 авг. 2010 г.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 8 печатных работ, поданы две заявки на выдачу патента Российской Федерации на изобретение, на одну получен патент.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и рекомендаций, списка использованных источников из 119 наименований, приложения. Содержит 170 страниц, 3 таблицы, 42 рисунка и 14 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса, цель и задачи исследования» проведен обзор и анализ технологий и технологических линий для содержания коров в летний период.

В настоящее время, при восстановлении животноводства в Псковской области, и отсутствии научно-технического решения размещения оборудования пастбищных комплексов, необходимо обоснование технологий и технологических линий пастбищного содержания скота на перспективное развитие.

На основе анализа научных работ сформулированы цель и задачи исследования. Значительный вклад в решение рассматриваемой проблемы внесли ряд ученых и исследователей, среди которых можно отметить: Н.Г. Андреева, Г.А. Кука, Б.И. Вагина, А.И. Зеленцова, Л.П. Карташова, Л.П. Кармановского, С.В. Мельникова, А.И. Купреенко, В.Н. Туваева, И.Н. Босина, А. Учеваткина, Н.М. Морозова, Ю.М. Цоя, Б.Н. Юдаева и других.

Во второй главе «Теоретическое обоснование технологических процессов на пастбищных комплексах и охлаждения молока естественным холодом» представлен алгоритм достижения поставленной цели, а также метод обоснования энергосберегающих технологических линий для производства молока на пастбищных комплексах, обоснованы процессы охлаждения молока и воды при использовании естественного холода.

Объективным критерием оптимальности производства молока в условиях пастбищ может служить критерий минимума затрат энергии E_{onm} , МДж/кг, при его производстве

$$E_{onmi} = \frac{\sum_{j=1}^n \mathcal{E}_j}{V_c \cdot N_{noz}} \rightarrow \min, \text{ МДж/кг}, \quad (1)$$

где \mathcal{E}_j – энергозатраты на выполнение j - го технологического процесса, МДж.

n - количество технологических процессов;

Y_c - сезонный надой на фуражную корову, кг/гол;

N_{noz} - поголовье пастбищного комплекса, гол.

Оперативный способ охлаждения – прокачивание молока по охлаждаемой водой трубе. В нашу задачу входило рассмотреть степень снижения температуры молока при его движении по трубопроводу при стационарном теплообмене молока с охладителем.

Установлена связь температуры молока с его начальной температурой, температурой охлаждающей воды, геометрическими размерами трубопровода и скоростью течения. Определен поперечный размер трубопровода, способствующий эффективному охлаждению.

Температурное поле внутри трубы при стационарном теплообмене описывается дифференциальным уравнением в частных производных

$$\partial t / \partial x = (\lambda / \rho_m c_m v(r)) (\partial^2 t / \partial r^2 + \partial t / (r \partial r)) + \partial^2 t / \partial x^2, \quad (2)$$

где t – температура, К; x – осевая координата, м; λ – коэффициент теплопроводности молока, Вт/(м·К); ρ_m – плотность молока, кг/м³; c_m – удельная теплоемкость молока, Дж/(кг·К); $v(r)$ – скорость течения молока, м/с; r – радиальная координата, м.

Уравнение (2) решим при граничных условиях

$$t(r, 0) = t_0, (\lambda \partial t / \partial r)_{r=R} + \alpha_1 (t - t_1) = 0, \quad (3)$$

где t_0 – начальная температура молока на входе в трубопровод, К; R – радиус внутренней поверхности трубы, м; α_1 – коэффициент теплоотдачи от молока к внутренней поверхности трубы, Вт/(м²·К); $t_1 = t_1(R, x)$ – температура внутренней поверхности.

Из граничного условия (3) следует, что в области, близкой к внутренней поверхности, температурное поле удовлетворяет не только уравнению (2), но и уравнению

$$\lambda \partial t / \partial r + \alpha_1 (t - t_1) = 0. \quad (4)$$

Представим уравнение (4) в таком виде

$$\partial t / \partial r = -\beta_1 (t - t_1), \quad (5)$$

где $\beta_1 = \alpha_1 / \lambda$.

Вычислив производную по r от левой и правой части равенства (5), получим

$$\partial^2 t / \partial r^2 = \beta_1^2 (t - t_1). \quad (6)$$

Подставив (4) и (5) в (2), получим уравнение

$$\partial t / \partial t = a (\beta_1^2 - \beta_1 / r) (t - t_1) / v(r) + a \partial^2 t / v(r) \partial^2 x, \quad (7)$$

где $a = \lambda / (c_m \rho_m)$ – температуропроводность молока, м²/с.

Введем в (7) температуру охлаждающей воды t_B . Тогда

$$t - t_1 = q / \alpha_1. \quad (8)$$

Для тонкостенной трубы плотность теплового потока

$$q = (t - t_B) / (1 / \alpha_1 + d / \lambda_{mp} + 1 / \alpha_2), \quad (9)$$

где d – диаметр трубы, м; λ_{mp} – теплопроводность трубы; α_2 – коэффициент теплоотдачи от верхней поверхности трубы к воде.

Подставив (9) в (8), находим

$$t - t_1 = k_{12}(t - t_B), \quad (10)$$

где $k_{12} = 1 / (1 + \alpha_1 d / \lambda_{mp} + \alpha_1 / \alpha_2)$.

Введем снижение температуры молока $\theta = t - t_B$. (11)

Если учесть, что температура воды постоянна, то скорость $v(r)$ при турбулентном течении можно аппроксимировать средней скоростью

$$u = V_m / (\pi R^2), \quad (12)$$

где V_m – объемная скорость молока, м³/с.

Подставив (10) – (12) в (7), получим

$$\partial \theta / \partial x = (a/u)(\beta_1^2 - \beta_1/R)k_{12}\theta + (a/u)\partial^2 \theta / \partial x^2. \quad (13)$$

$$\bar{\theta}(s) = s \int_0^{\infty} e^{-sx} \theta(x) dx,$$

где s – комплексный параметр.

Преобразовав уравнение (13), получим следующее алгебраическое уравнение

$$s(\bar{\theta} - \theta_0) = -(a/u)b_{12}\bar{\theta} + s^2(\bar{\theta} - \theta_0 - \theta_x'(0)/s),$$

где $\theta_0 = t_0 - t_B$; $b_{12} = (\beta_1/R - \beta_1^2)k_{12}$; $\theta_x'(0) = (d\theta/dx)_{x=0}$.

$$\bar{\theta} = \theta_0 + \theta_x'(0)/(S - u/a) + b_{12}\bar{\theta}/S(S - u/a).$$

$$\theta = \theta_0 + (a/u)\theta_x'(0)(e^{ux/a} - 1) + (a/u)b_{12} \int_0^x \theta(e^{u(x-\xi)/a} - 1) d\xi. \quad (14)$$

При оценке решения интегрального уравнения (14) учтем, что функция $\theta(\xi)$ в подынтегральном выражении меняется медленнее, чем множитель в скобках, содержащий показательную функцию. Поэтому вынесем $\theta(\xi)$ из под знака интеграла при её значении $\theta(x)$ у верхнего предела интегрирования.

После вычислений получим алгебраическое уравнение

$$\theta = \theta_0 + (a/u)\theta_x'(0)(e^{ux/a} - 1) + (a/u)b_{12}((a/u)(e^{ux/a} - 1) - x)\theta. \quad (15)$$

Из (15) после некоторых несложных преобразований находим

$$\theta = \theta_0 / (1 + ab_{12}x/u). \quad (16)$$

Приближенная формула (16) пригодна для любой текущей по трубопроводу жидкости, но для молока она наиболее точная. Действительно, из (16) следует, что

$$\theta_x'(0) = (d\theta/dx)_{x=0} = -ab_{12}\theta_0/u. \quad (17)$$

Перепишем интегральные функции в (14) в ином виде

$$\begin{aligned} \int_0^x \theta(\xi)(e^{u(x-\xi)/a} - 1) d\xi &= \int_0^x (e^{u\xi/a} - 1)\theta(x - \xi) d\xi = \\ &= \int_0^x e^{u\xi/a} \theta(x - \xi) - \int_0^x \theta(x - \xi) d\xi. \end{aligned} \quad (18)$$

Асимптотическое значение первого интеграла при $u/a \gg$ равно $(a/u)\theta_0 e^{ux/a}$. Подставим асимптотическое значение (18) в (14). При любой конечной скорости и конечной длине трубопровода x , величина $e^{ux/a} \gg 1$. Поэтому всеми членами в (14), не содержащими множитель $e^{ux/a}$, пренебрежем и получим асимптотическое равенство:

$$((a/u)\theta_x^1(0) + (a/u)^2 b_{12} \theta_0) e^{ux/a} = 0.$$

Из него следует результат (17).

Используем определение температуропроводности a , величины b_{12} и средней скорости (12), тогда

$$ab_{12}/u = \pi k(R - \alpha_1 R^2 / \lambda) / c_m \rho_m V_m, \quad (19)$$

где $k = 1/(1/\alpha_1 + d/\lambda_{mp} + 1/\alpha_2)$.

Обозначим

$$A = \pi k(R - \alpha_1 R^2 / \lambda) / c_m \rho_m. \quad (20)$$

Величина A имеет размерность температуропроводности (m^2/c) и фактически является температуропроводностью трубопровода с молоком. Из теоретических расчетов видно, что тем эффективнее будет снижаться температура молока в трубопроводе, чем будет больше величина A .

Если переписать формулу (20) для трубопровода известной длины $x = L_{zm}$ с известной скоростью объемного течения V_m , получим

$$t - t_e = (t_0 - t_e)(1 + Ax/V_m). \quad (21)$$

Измеренные значения температур $t = t_L$ на выходе из трубопровода, t_e , t_0 подставим в (20). Для A из (20) получим по экспериментальным данным следующий результат

$$A = (t_0 - t_L)V_m / (t_L - t_e)L_{zm}. \quad (22)$$

Затем численное значение температуропроводности (22) можно использовать для анализа снижения температуры молока другими аналогичными трубопроводами. Полученные результаты можно применять в практике проектирования трубчатых теплообменников для охлаждения молока.

Для выявления изменения температуры капли воды составим дифференциальное уравнение

$$cmdT = qdm + c_e dmT + \sigma dS - (T - T_0)Sd\tau, \quad (23)$$

где c_e – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг К); T_0 – начальная температура воды, К; T – текущая температура воды, К; m – масса капли, кг; dT – дифференциал абсолютной температуры капли, К; q – удельная теплота испарения воды, Дж/кг; σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, Дж/м²; S – текущая площадь поверхности капли, м²; τ – время падения капли, с.

Масса шаровидной капли

$$m = (\rho_e 4/3)\pi r^3, \quad (24)$$

где ρ_e – плотность воды, кг/м³; r – текущий радиус капли, м.

Из (24) следует

$$r = (3m / 4\pi\rho_e)^{1/3}. \quad (25)$$

Текущая площадь поверхности капли, согласно (25),

$$S = 4\pi r^2 = 4\pi(3m / 4\pi\rho_e)^{2/3}. \quad (26)$$

Продифференцировав (26), находим

$$dS = (8\pi / 3)(3 / 4\pi\rho_e)^{2/3} m^{-1/3} dm. \quad (27)$$

У поверхности капли наблюдается как испарение, так и конденсация. Однако даже при насыщении воздуха водяными парами у поверхности будет преобладать испарение, поскольку давление насыщения вблизи неё превышает давление насыщенных паров в воздухе. Элементарное изменение массы dm за время $d\tau$ представим в виде $-dm = jSd\tau$, где j – плотность потока воды с поверхности, кг/ (м² К).

$$\text{Тогда} \quad d\tau = -dm / jS. \quad (28)$$

$$cmdT = qdm + c_e T dm + bm^{1/3} dm + (\alpha / j)(T - T_e) dm, \quad (29)$$

$$\text{где} \quad b = (8\pi\sigma / 3)(3 / 4\pi\rho_e)^{2/3}; \quad (30)$$

T_e – абсолютная температура воздуха, К.

Разделим (29) на cdm и запишем его в виде

$$dT / d(\ln m) - (1 + \alpha / cj)T = q / c + (b / c)m^{-1/3} - (\alpha / cj)T_e. \quad (31)$$

где α – коэффициент теплообмена воды с воздухом, Дж/(м²·К).

Введем новую переменную $x = \ln m$. Тогда равенство (31) примет следующий вид

$$dT / dx - (1 + \alpha / c_e j)T = q / c_e + (b / c_e)e^{-kx/3} - (\alpha / c_e j)T_e, \quad (32)$$

$$\text{где} \quad x_0 = \ln m_0. \quad (33)$$

m_0 – начальная масса капли, кг.

Решим уравнение (31), заменим текущую плотность потока j средним значением j_{cp} в интервале (x_0, x) и обозначим

$$k = 1 + \alpha / (c_e j_{cp}). \quad (34)$$

Тогда уравнение (33) примет вид

$$dT / dx - kT = q / c_e + (b / c_e)e^{-kx/3} - (\alpha / c_e j)T_e. \quad (35)$$

Решив уравнение (35), получим

$$T = T_0 e^{k(x-x_0)} - (q / kc_e)(1 - e^{k(x-x_0)}) - ((3b / (1 + 3k))c_e)(e^{-x/3} - e^{k(x-x_0)}) + (\alpha / kc_e j_{cp})(1 - e^{k(x-x_0)})T_e \quad (36)$$

В формуле (36) вернёмся к переменной $x = \ln m$ и используем условие (23) и равенство

$$e^{k(x-x_0)} = e^{k(\ln m - \ln m_0)} = e^{k \ln(m / m_0)} = (m / m_0)^k. \\ T = (m / m_0)^k T_0 + (\alpha / kc_e < j >)(1 - (m / m_0)^k)T_e - (q / ke)(1 - (m / m_0)^k) - (3b / (1 + 3k))m^{-1/3}(1 - m / m_0)^{k+1/3} \quad (37)$$

Среднюю плотность j_{cp} потока массы от капли за время её падения τ найдем из выражения (28), записав его, согласно (26), в таком виде

$$jd\tau = -\frac{dm}{S} = -\frac{dm}{4\pi(3m/4\pi\rho_e)^{2/3}} \quad (38)$$

$$\int_0^\tau jd\tau = j_{cp}\tau = -\int_{m_0}^m dm/4\pi(3m/4\pi\rho_e)^{2/3} = (3/4\pi)(4\pi\rho_e/3)^{2/3}(m_0^{1/3} - m^{1/3}) \cdot$$

Результаты значительно упрощаются, если вместо капли использовать её радиальный размер, согласно выражения (24)

$$j_{cp}\tau = \rho_e(r_0 - r) = \rho_e|\Delta r| \cdot$$

$$j_{cp} = \rho_e|\Delta r|/\tau \cdot \quad (39)$$

$$k = 1 + \alpha\tau / \rho c|\Delta r| \cdot \quad (40)$$

Согласно (30) и (39) формула (37) примет следующий вид

$$T = \left(\frac{r}{r_0}\right)^{3k} T_0 + \left(\frac{\alpha\tau}{kc_e\rho_e|\Delta r|}\right) \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^{3k}\right) T_e - \left(\frac{q}{kc_e}\right) \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^{3k}\right) - \left(\frac{2\tau}{\rho_e(1/3+k)c_e r}\right) \left(1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^{3k+1}\right) \quad (41)$$

Температура капли будет минимальной при полном испарении, когда её радиус станет равным

$$r_m = (3\mu/4\pi\rho_e N_A)^{1/3}, \quad (42)$$

где $\mu = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса воды; N_A – число Авогадро; r_m – эффективный радиус одной молекулы воды.

В этом случае $r_m \ll r_0$.

Температура полного испарения каплей T_H практически не зависит от начальной температуры T_0 и определяется по формуле

$$T_H \cong (\alpha\tau_H / k_H c_e \rho_e r_0) T_e - q / k_H c_e - b\sigma / (3k_H + 1) c_e r_m, \quad (43)$$

где τ_H – время полного испарения капли; $k_H = 1 + (\alpha\tau_H / (\rho c r_0))$. (44)

Для расчета времени полного испарения воспользуемся вторым законом Ньютона

$$d(mv)/d\tau = dm v / d\tau + m dv / d\tau = (m - m_e)g - 6\pi\eta_e r(v - v_e) - 0,5C_x \rho_{воз} (v - v_e)^2 S_m, \quad (45)$$

где $m_e = (4/3\rho_e)\pi r^3$ – масса воздуха, вытесненного объемом капли; $\rho_{воз}$ – плотность воздуха, кг/м³; η_e – вязкость воздуха, Па · с; v_e – скорость встречного потока воздуха, м/с; C_x – коэффициент лобового сопротивления движению капли; $S_m = \pi r^2$ – площадь лобового сопротивления движению капли, м².

Обычно скорость падения капли v примерно равна скорости v_0 её выхода из рассеивателя, тогда $dv/d\tau = 0$. Из (28) и (39) следует

$$dm/d\tau = -jS = -(-\rho_e dr/d\tau)S = (\rho_e dr/d\tau)4\pi r^2 \cdot$$

$$\rho v_0 (dr/d\tau)4\pi r^2 = (\rho - \rho_e)g(4/3)\pi r^3 - 0,5C_x \rho_e (v_0 - v_e)^2 \pi r^2 - 6\pi\eta_e (v_0 - v_e) r \cdot \quad (46)$$

Разделив в (46) переменные, получим

$$d\tau = -\frac{4\rho v_0 r dr}{\left(\frac{4}{3}(\rho_e - \rho_{воз})\right)gr^2 - \frac{1}{2}C_x \rho_{воз}(v_0 - v_e)^2 r - 6\eta_e(v_0 + v_e)}$$

$$\tau_u = \frac{2\rho v_0}{A} \left(\ln \left| \frac{2Ar_0 - BW^2 r_0 - 6\eta_e W}{2Ar_m - BW^2 r_m - 6\eta_e W} \right| - \frac{BW^2}{D(W)} \ln \left| \frac{2Ar_m - BW^2 - D(W)}{2Ar_m - BW^2 + D(W)} \right| \right) \times \left(\frac{|2Ar_0 - BW^2 + D(W)|}{|Ar_0 - BW^2 - D(W)|} \right), \quad (47)$$

где $A = \frac{4}{3}(\rho_e - \rho_{\text{воз}})g$, $B = \frac{1}{2}C_x \rho_{\text{воз}}$, $W = v'_0 + v_e$, (48)

v'_0 – скорость падения капли в неподвижном воздухе, м/с;

v_0 – скорость падения капли во встречном потоке воздуха, м/с;

$$D(W) = \sqrt{B^2 W^4 + 24A\eta_e W}. \quad (49)$$

Из (48) и (49) следует, что $\lim_{W \rightarrow \infty} \tau_H = 0$.

Поскольку $r_0 \gg r_m$ можно пользоваться простой, но достаточно точной формулой

$$\tau_u = \frac{2\rho v_0}{A} \ln \frac{Ar_0^2 - BW^2 r_0 - 6\eta_e W}{6\eta_e W}. \quad (50)$$

Таким образом, при увеличении скорости капли относительно воздушного потока время полного испарения уменьшится и асимптотически стремится к нулю.

Следовательно, это время можно изменять, меняя скорость встречного потока воздуха. Радиус отверстий $r_{\text{отв}}$ примерно равен радиусу капли r_0 .

Для вычисления τ_H нужно знать скорость v_0 движения капли. При расчете её можно принять равной скорости выхода капли из отверстия распылителя

$$v_0 = Q / N_A 4\pi r_0^2, \quad (51)$$

где Q - объемная скорость воды, поступающей в распылитель, м³/с.

Определив время τ_H по формулам (37) – (41) рассчитаем путь полного испарения капли

$$H_H = v_0 \tau_H. \quad (52)$$

Для эффективного охлаждения змеевика уровень воды в установке должен находиться на расстоянии от распылителя, не меньшим чем H_H . Данные эксперимента подтверждают этот вывод. Эти данные целесообразно использовать при проектировании воздушно-капельных систем теплообмена.

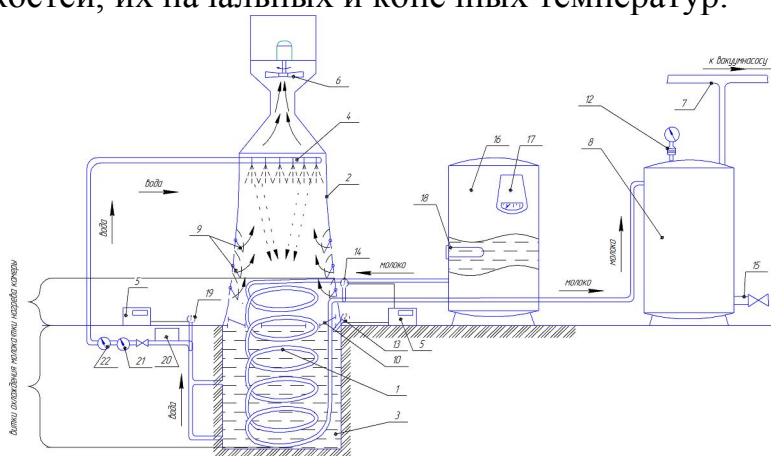
В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» изложена программа экспериментальных исследований, описана экспериментальная установка (рис. 1), приведены методики проведения и обработки результатов экспериментальных исследований.

Целью исследования на данном этапе была проверка соответствия теоретических изысканий экспериментальным данным.

В качестве объекта исследования была смонтирована экспериментальная установка для охлаждения молока естественным холодом (рис. 1). Установка состоит из змеевикового теплообменника, камеры воздушно-капельного распыления, вентилятора и устройств для регулирования давления воды, потока воздуха.

Теоретические исследования и поисковые опыты, а также анализ литературных источников позволили сделать выбор факторов необходимых для исследования работы установки: начальной температуры воды $t_{вн}(b_1)$, длины змеевика $L_{зм}(b_3)$, объёмной скорости молока $V_{м}(b_2)$, диаметра отверстий распылителя $d_p(b_5)$, давления воды $p_e(b_4)$, скорости воздушного потока $v_{воз}(b_6)$.

Программа исследований включала трехфакторные эксперименты по оптимизации параметров и режимов установки. Экспериментальные исследования проводились в соответствии с действующими стандартами и общепринятыми методиками на экспериментальной установке, включающей набор контрольно-измерительных приборов по определению массовых расходов жидкостей, их начальных и конечных температур.



1 – змеевиковый теплообменник для молока; 2 – теплообменная камера; 3 – теплоизолированный аккумулятор холода; 4 – распыливающее устройство; 5 – микропроцессорный измеритель; 6 – вентилятор; 7 – вакуумпровод; 8 – теплоизолированная емкость для охлажденного молока; 9 – жалюзи; 10 – крышка; 13,14 19 – датчики температуры; 12 – прибор КИ 4840; 15 – патрубок для слива; 16 – емкость для получения парного молока; 17 – терморегулятор; 18 – нагревательный элемент; 20 – центробежный насос; 21 – манометр; 22 – счетчик-расходомер.

Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Полученные опытные данные обрабатывались с использованием программы «Statgraphics Plus».

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» приведены результаты экспериментальных исследований установки в лабораторных и производственных условиях. Получены математические модели, описывающие процессы охлаждения молока и воды.

1. Изменение конечной в результате охлаждения температуры молока в зависимости от начальной температуры воды b_1 , длины змеевикового теплообменника b_3 и объёмной скорости молока b_2

$$t_{мк} = 15,2133 - 1,4775 b_1 - 0,7975 b_2 - 0,62 b_3 + 0,225 b_1 \cdot b_2 - 0,27 b_1 \cdot b_3 + 0,38 b_2 \cdot b_3 + 1,2058 b_2^2 - 0,9108 b_3^2, \quad (53)$$

где $t_{мк}$ – конечная температура молока, °С.

2. Изменение температуры воды, полученной в результате воздушно-капельного распыления в зависимости от давления воды b_4 , диаметра отверстий распылителя b_5 , скорости воздушного потока b_6

$$t_{\text{вкр}} = 10,0533 - 0,895 b_4 + 0,1912 b_5 + 0,8125 b_6 + 0,67 b_4 \cdot b_5 + 0,56 b_4 \cdot b_6 +$$

где $t_{\text{вкр}}$ – температура воды, полученной в результате воздушно-капельного распыления, °С.
 $+1,1032 b_4^2 + 1,7945 b_5^2 + 1,0545 b_6^2$.

3. Понижение температуры воды, полученное в результате воздушно-капельного распыления, в зависимости от давления воды b_4 , диаметра отверстий распылителя b_5 , скорости воздушного потока b_6 :

$$\Delta t_e = 9,6133 + 0,895 b_4 - 0,5125 b_5 + 0,1675 b_6 - 0,325 b_4 \cdot b_5 + 0,1 b_5 \cdot b_6 - 1,1867 b_4^2 - 1,5517 b_5^2 - 0,8616 b_6^2, \quad (55)$$

где Δt_e – понижение температуры воды, °С.

По уравнениям регрессии построены поверхности отклика (рис. 2-7).

Совмещённый анализ всех зависимостей позволяет сделать следующий определяющий вывод:

- факторы $t_{\text{МК}}$, $L_{\text{зм}}$, и $V_{\text{м}}$ необходимо отнести как однозначно (и положительно) влияющие на состояние температурного уровня охлаждаемого продукта;
- оптимальный температурный уровень хладагента находится в пределах 9,2...9,5 °С;
- оптимальное значение длины змеевикового теплообменника при заданной объёмной скорости молока находится в пределах 10,8...11м;
- оптимальная объёмная скорость молока устанавливается в пределах 0,80...0,82 м³/ч.

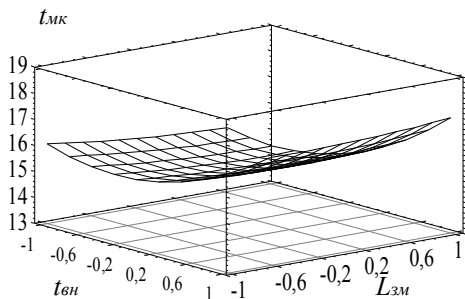


Рис. 2 – Зависимость конечной температуры молока от начальной температуры воды и длины змеевикового теплообменника

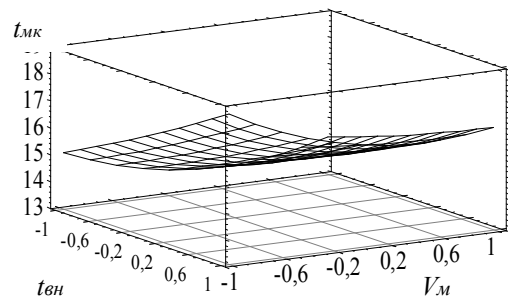


Рис. 3 – Зависимость конечной температуры от начальной температуры воды и объёмной скорости течения молока

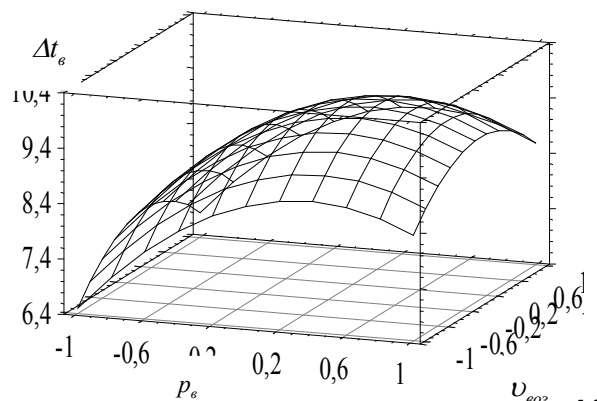
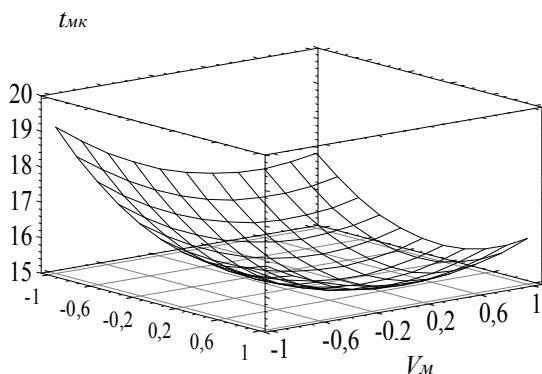


Рис. 4 – Зависимость конечной температуры молока от объемной скорости молока и длины змеевикowego теплообменника

Рис. 5 – Зависимость понижения температуры от давления воды в системе и скорости воздушного потока

При анализе зависимостей охлаждения воды, возможно, сделать следующие выводы:

- поверхности отклика позволяют определить значение рабочих параметров, обеспечивающих уверенную минимизацию конечной температуры воды при её охлаждении в процессе воздушно-капельного распыления как хладагента в пределах диапазона температур от 10,4 до 10,9 °С.
- значениями рабочих параметров являются по давлению в системе подачи воды 0,12 МПа; по скорости воздушного потока 0,56 м/с; по диаметру отверстий распылителя 1,2 мм.

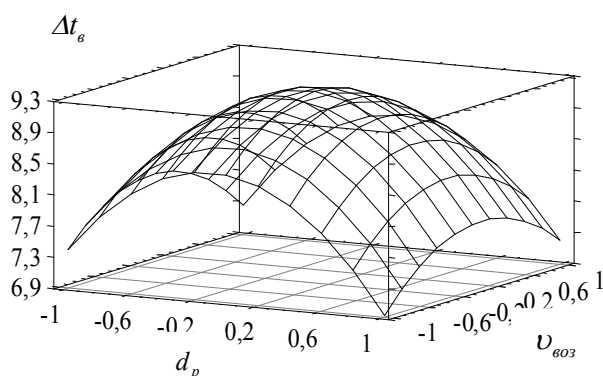


Рис. 6 – Зависимость понижения температуры молока от диаметра отверстий распылителя и скорости воздушного потока

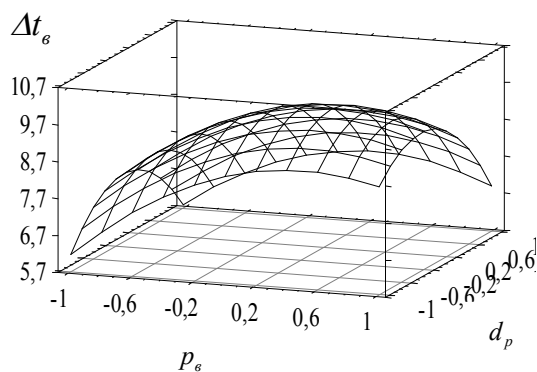


Рис. 7 – Зависимость понижения температуры от давления воды в системе и диаметра отверстий распылителя

Производственные испытания полностью подтвердили теоретический расчет и лабораторные исследования. Разработаны рекомендации по выбору параметров установки для охлаждения молока естественным холодом для конкретных условий.

Обоснованная технологическая линия для пастбищных комплексов обеспечивает выполнение следующих операций: подгон на доение; доение коров; поение животных; первичную обработку и хранение молока; кормление концентратами во время доения; получение теплой воды на технологические нужды; удаление навоза (рис. 8).

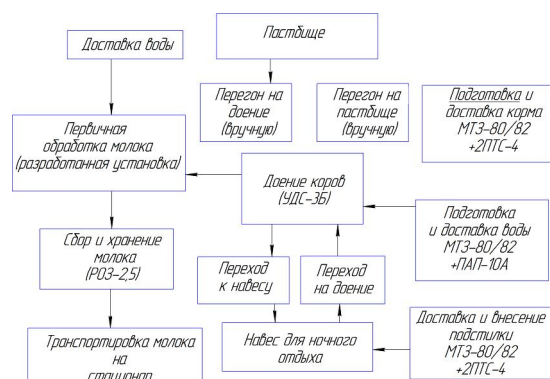


Рис. 8 – Обоснованная технологическая линия функционирования пастбищного комплекса

На основании проведенных исследований рекомендована технологическая линия для пастбищных комплексов с доением коров на доильной установке УДС-3Б. Выдоенное молоко по молокопроводу через фильтр направляется на первичное охлаждение в разработанную установку, где охлаждается до температуры 14...14,1°C. Затем молоко направляется на доохлаждение и хранение в молочный вакууммированный резервуар. Для первичного охлаждения молока используется вода, охлажденная в разработанной установке.

На основании расчетов, полученных по формуле 1 построены зависимости критерия энергозат.

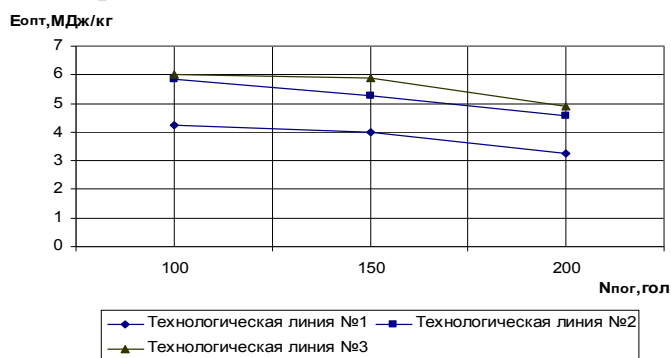


Рис. 9 – Зависимость минимума энергозатрат от поголовья пастбищного комплекса

В пятой главе представлены результаты расчета экономической эффективности предлагаемой технологической линии. Варианты расчетов: молоко, охлажденное без использования первичного этапа, в танке-охладителе и молоко, прошедшее поточно-технологическую линию первичной обработки с использованием разработанной установки.

Разработанная технологическая линия обеспечивает снижение затрат энергии на 27%, при этом удельные энергозатраты составили 3,27 МДж/кг, по сравнению с технологией принятой в хозяйстве.

Технико-экономическую эффективность использования предлагаемой установки для первичного охлаждения молока определена на основании разности затрат на 1 кг молока при существующей и предлагаемой технологической линии производства молока на пастбищных комплексах.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. В Северо-Западной зоне Российской Федерации при пастбищном содержании коров в условиях отсутствия централизованного энергообеспечения для повышения его эффективности требуется внедрение новой энергосберегающей технологии, в том числе с использованием естественного холода при первичной обработке молока.

2. Степень эффективности обосновывается критерием минимизации энергозатрат на производство молока.

3. Для снижения температуры молока и определения рабочих параметров установки осуществлено теоретическое обоснование на основе разработанной математической модели, учитывающей проходящие теплообменные процессы при его охлаждении в замкнутом трубчатом потоке с определением численных значений температуропроводности (ф.22), определяющее снижение температуры молока.

4. Конструктивные и технологические параметры и режимы работы охладителя молока определены анализом физических свойств при удалении теплоты путем испарения капельной массы в воздушном противотоке (ф.50, ф.52), эти условия определяют рациональную высоту установки распылителя.

5. Установлено, что для интенсификации процесса первичного охлаждения молока до температуры 14,0...14,4 °С необходимы параметры и режимы работы охладителя молока: длина теплообменника 11 м, температура воды в аккумуляторе холода 10,2...10,4 °С при кратности воды 2 и объемной скорости молока 0,82 м³/ч.

6. Для снижения температуры воды до 10,2...10,4 °С в результате воздушно-капельного теплообмена следует использовать следующие рациональные конструктивные параметры теплообменной камеры: диаметр отверстий распылителя 1,1...1,2 мм; скорость воздушного потока 0,56...0,58 м/с; давление в системе распыления воды 0,126...0,129 МПа при производительности 1,8 м³/ч.

7. Предлагаемая энергосберегающая технологическая линия производства молока на пастбищных комплексах при отсутствии централизованного электроснабжения обеспечивает: доение на установке УДС-3Б, очистку, первичное охлаждение молока и его хранение. Результаты производственной проверки в молочном комплексе ЗАО «Великолукское» Великолукского района Псковской области позволили получить снижение себестоимости производства молока при внедрении энергосберегающей технологической линии до 9,46 руб./кг, а также удельные энергозатраты составили 3,27 МДж/кг, что на 27% ниже существующей. При этом экономическая эффективность составила 595129,27 руб. Производственными испытаниями установлено, что использование новой установки для охлаждения молока с использованием естественного холода позволяет

получить сезонный экономический эффект от снижения затрат на охлаждение 364200 рублей.

**Основные положения диссертации опубликованы
в следующих работах:**

1. Герасимова О.А. Организация пастбищных комплексов // А.О. Герасимова. – Сельский механизатор № 9, 2007. – 39с.

2. Герасимова О.А. Энергосбережение при совершенствовании механизированных процессов в скотоводстве / сборник трудов «Достижение науки в скотопромышленном производстве» (материалы юбилейной научно-практической конференции) / Герасимова О.А., Гусейнов Р.Г., Макарова Г.В., Дружинина Е.С., Шилин В.А., Замиралов, Голубев И. - Великие Луки, 2007г.

3. Герасимова О.А., Гусейнов Р.Г., Шилин В.А., Макарова Г.В. Мобильный пастеризатор для фермерских хозяйств // Материалы III научно-практической конференции молодых ученых, РИО ВГСХА, 2008г. – с. 202...203.

4. Герасимова О.А. Использование естественного холода для охлаждения молока на пастбищах // Материалы Международной научно-практической конференции «Сельское хозяйство: проблемы и перспективы», РИО ВГСХА, 2009г. – с. 214...217.

5. Герасимова О.А. Охлаждение молока на пастбищных комплексах с использованием естественного холода // Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых, РИО ВГСХА, 2010г. – с. 196...198.

6. Герасимова О.А., Шилин В.А., Волошин Ю.И. Охлаждение молока при стационарном течении по трубопроводу с охладителем // Техника в сельском хозяйстве № 5, 2010. – 11...13.

7. Герасимова О.А., Гусейнов Р.Г., Шилин В.А., Сукиасян С.М. Первичное охлаждение молока при турбулентном течении // Материалы Междунар. науч.-прак. конф. молодых ученых (Минск, 25-26 авг. 2010). – Минск: НПЦ НАН Белоруссии по механизации сельского хозяйства, 2010.

8. Герасимова О.А., Шилин В.А. Охлаждение молока на пастбищных комплексах с использованием естественного холода // А.О. Герасимова, В.А. Шилин – Сельский механизатор № 5, 2011. – с. 24.

9. Патент № 95974 RU МПК А23С 3/02 Мобильное устройство для транспортировки молока / Герасимова О.А., Шилин В.А., Гусейнов Р.Г. (RU). - № 2010103302/22, заявлено 01.02.2010, опубликовано 20.07.2010, бюл. №20.

Лицензия ЛР № 040831 Подписано к печати 10.05.11 г.
Формат 60 x 90/16
Усл. печ. 1,0 л. Тираж 100 экз.
Заказ 64

Редакционно-издательский отдел ФГОУ ВПО «ВГСХА»
182100, г. Великие Луки, пл. Ленина, 1