

На правах рукописи

Шешунова Елена Владимировна

Эффективность использования теплового насоса
для охлаждения молока и нагрева воды
на животноводческих комплексах АПК

05.20.01 – технологии и средства механизации
сельского хозяйства

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва- 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия».

Научный руководитель (консультант): кандидат технических наук, профессор Краснов Сергей Алексеевич.

Официальные оппоненты:

Григорьев Виктор Степанович – к.х.н., д.т.н., профессор государственного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка» Россельхозакадемии» (ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии), ведущий научный сотрудник.

Трушевский Станислав Николаевич – к.т.н., с.н.с. государственного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии» (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии), ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация: государственное научное учреждение «Ярославский научно-исследовательский институт животноводства и кормопроизводства»

Защита состоится 24 мая 2012 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д006.034.01, на базе государственного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка Россельхозакадемии» (ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии), 109428, г. Москва, 1-й Институтский пр., д.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке государственного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка Россельхозакадемии» (ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии).

Автореферат разослан 19 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Соловьев Рудольф Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Для обеспечения в полном объеме процесса производства и переработки молока необходимо обеспечить бесперебойную и эффективную работу оборудования для первичной обработки, а именно, охладителей молока, так как этот процесс длительный и энергоемкий.

На животноводческих фермах агропромышленного комплекса для охлаждения молока, требуется использование холодильных установок. Но также, есть потребность и в горячей воде, которая используется для технологических целей и поения скота. Необходимо обеспечить и отопление отдельных помещений фермы, включая телятник в родильном отделении. Все эти операции можно выполнять при использовании оборудования и энергосберегающих технологий.

В большинстве случаев производителями молочного оборудования для охлаждения молока используется так называемый метод прямого или непосредственного охлаждения. Существенным недостатком этого способа является то, что скорость движения молока вдоль холодной стенки близка к нулю, и потому время его охлаждения с 37 до 5 градусов составляет 3 часа. Бактериальная обсеменённость за это время возрастает в десятки и даже сотни раз, что не позволяет выполнять требования новых стандартов качества сырого молока.

В настоящее время часто на некоторых фермах производится охлаждение молока до 0 °С, либо полное замораживание молока и дальнейшая его разморозка, что недопустимо, так как погибают все полезные микроорганизмы, позволяющие использовать молоко как сырье на перерабатывающих предприятиях, например, производство живых йогуртов.

Этим обуславливается актуальность и значимость темы исследования.

Цель исследования – Повышение эффективности охлаждения молока и снижение энергозатрат за счет оптимизации и совершенствования конструктивно-технологической схемы охлаждения молока и нагрева воды с применением новых инновационных энергосберегающих технологий.

Объект исследования – процесс охлаждения молока, охлаждающий комплекс, оборудованный тепловым насосом и охладителями молока.

Методика исследований. В соответствии с целью и задачами работа была разделена на несколько этапов:

- поиск информации по работе охладителей молока различных типов;
- научный анализ информации и оценка фактического мирового уровня состояния оборудования для охлаждения молока;
- оценка эффективности использования энергосберегающего оборудования для охлаждения.

Использованы методы статистического, математического моделирования и экономического анализа, теоретические основы теплотехники в части термодинамического анализа, основы теплопередачи, методы оптимизации для решения поставленных задач.

Обработка информации проводится по существующим методикам с использованием математической статистики и теории массового обслуживания.

Научная новизна работы состоит в установлении эффективности использования энергосберегающего оборудования для охлаждения молока; на основе термодинамических, теплофизических и технико-экономических методов оптимизации предложена математическая модель установок первичной обработки молока; разработана методика оценки термодинамической эффективности способов первичной обработки молока; разработан алгоритм энергоэффективного технологического процесса охлаждения молока и нагрева воды..

Практическая ценность: предложена новая энергосберегающая технология охлаждения молока, внедрена данная технология на животноводческой ферме. Предложен метод для определения энергетической эффективности существующих способов первичной обработки молока. Обоснованы оптимальные параметры (разность температур воды на входе и выходе из теплового насоса) и режимы работы (при наибольших коэффициентах преобразования тепла и холода: $K_T = 4...7$, $K_X = 3...6$) холодильного и теплообменного оборудования, позволяющего более чем в восемь раз снизить энергетические затраты на первичную обработку молока без увеличения капитальных вложений. Предложенный способ охлаждения молока позволяет сократить удельные энергозатраты в десятки раз по сравнению с существующими способами.

Приведенные данные подтверждены соответствующими актами. Полученные данные позволяют рекомендовать применение технологии охлаждения молока в хозяйствах АПК.

Реализация результатов исследований. Результаты исследований используются в учебном процессе на инженерном факультете ФГБОУ ВПО «Ярославская ГСХА», а также на животноводческом комплексе АПК.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на научно-практических конференциях:

- «Актуальные проблемы инженерного обеспечения АПК» ФГОУ ВПО «Ярославская ГСХА» (2003, 2007 – 2010г.);

- «Вклад молодых ученых в реализацию приоритетного национального проекта «Развитие агропромышленного комплекса» ФГОУ ВПО «Уральская ГАВМ» (2007 г.);

- «Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи» ФГОУ ВПО «Курганская ГСХА им. Т.С. Мальцева» (2010 г.);

- «Инновационные направления развития АПК и повышение конкурентоспособности предприятий, отраслей и комплексов – вклад молодых ученых» ФГОУ ВПО «Ярославская ГСХА» (2011 - 2012 гг.);

- «Науке нового века – знания молодых» ФГОУ ВПО «Вятская ГСХА» (2011 г.);

- «Аграрная наука – сельскому хозяйству» ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет» (2012 г.).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 21 научной работе, из которых пять опубликованы в издании, рекомендованных ВАК РФ.

Защищаемые положения:

- математические модели и алгоритмы технологического процесса охлаждения молока и нагрева воды;
- математические зависимости, метод и критерий оптимизации параметров охлаждения молока и нагрева воды;
- конструктивно-технологическая схема охлаждения молока и нагрева воды с применением теплового насоса;
- оптимизация технологических параметров и температурные режимы охлаждения молока и нагрева воды;
- оценка эффективности использования энергосберегающей технологии охлаждения молока и нагрева воды с применением теплового насоса.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести разделов, общих выводов, списка литературы, изложена на 146 страницах машинописного текста, включая библиографию из 134 наименований, 31 рисунков, 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано краткое изложение основных вопросов исследуемой задачи, а также обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы, научная новизна, практическая ценность и реализация результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе "Обзор техники и технологий охлаждения молока» проведены научные исследования литературных источников и передового опыта по вопросам механизации технологического процесса охлаждения молока. Основной вклад в развитие науки о первичной обработке и переработке молока внесли следующие ученые и экспериментаторы: Фьорд Нильс (1870 г. – проведение опытов над сохранением и применением льда и снега в молочной промышленности; опытов медленного и быстрого охлаждения молока); Тепляков М.М., Ильина С.А. (аналитическое моделирование процессов теплообмена в кожухотрубном аппарате для первичного охлаждения молока); Канунников А.А. (представил порядок расчета холодопроизводительности установки охлаждения жидкостей).

Также большой вклад в решение проблемы по охлаждению молока (эффективное использование естественного холода) внесли ученые Бобков В.А., Марьяхин Ф.Г., Босин И.Н., Коршунов Б.П., Мусин А.М., Цой Ю.А. и другие.

Анализ отечественных и зарубежных охладителей позволяет сделать вывод, что перспективным является постепенное охлаждение молока с целью сохранения молочнокислых бактерий, необходимых для производства живых йогуртов.

В настоящее время энергосберегающим технологиям придается все большее значение, так как тарифы на электроэнергию растут, и стоимость ее в ближайшие годы будет увеличиваться, поэтому актуальность энергосбережения при охлаждении молока будет возрастать.

На основании анализа оборудования для охлаждения молока установлено, что необходимо применять экономичные его виды, одним из которых являются тепловые насосы.

По результатам проведенных научных исследований поставлены следующие задачи:

- разработать на основе анализа существующих схем охлаждения молока и перспектив развития техники энергосберегающую, эффективную и экономически определяющую технологию охлаждения молока и нагрева воды;
- разработать модели и алгоритмы решения процессов охлаждения молока и нагрева воды;
- создать комбинированную энергэфективную установку охлаждения молока и нагрева воды;
- разработать метод оптимизации и получить критерии оптимизации параметров охлаждения молока и нагрева воды;
- оптимизировать технологические параметры и температурные режимы охлаждения молока и нагрева воды;
- оценить экономическую и энергетическую эффективность.

Во второй главе «Теоретическое обоснование способов повышения эффективности использования технологий охлаждения молока» рассмотрено влияние технологии охлаждения молока на его качество, разработаны математические модели процессов охлаждения молока и нагрева воды, представлена расчетная модель установки охлаждения молока и нагрева воды.

Для определения термодинамических характеристик процесса охлаждения молока и нагрева воды по новой технологии и выбора теплообменника и теплового насоса предлагаются математические модели.

В основу расчета охлаждения молока с помощью пластинчатого охладителя положена модель с учетом переменных условий функционирования.

Предлагается структурная схема математической модели охлаждения молока, показанная на рисунке 1.

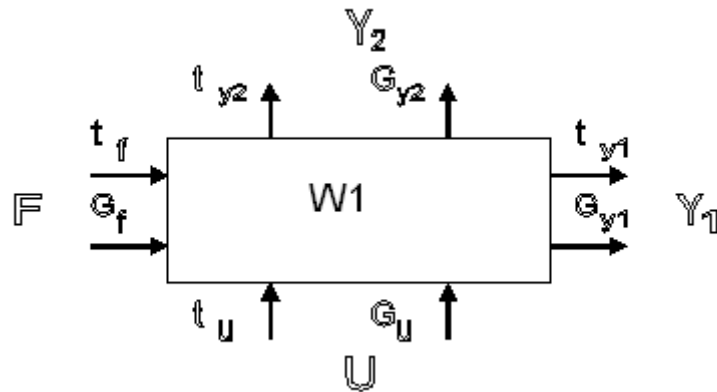


Рисунок 1 – Структурная схема математической модели охлаждения молока

Эта модель представляет установку охлаждения молока в виде системы, осуществляющей преобразование входных возмущающих и управляющих воздействий в выходные переменные параметры.

Где: $F = \{ t_f ; G_f \}$ – входной вектор условий охлаждения молока;

t_f – температура молока на входе в теплообменник, $^{\circ}\text{C}$;

G_f – расход молока на входе в теплообменник, кг/ч;

$U = \{ t_u ; G_u \}$ – входной вектор управления охлаждением молока;

t_u – температура воды на входе в теплообменник (тепловой насос), $^{\circ}\text{C}$;

G_u – расход воды на входе в теплообменник (тепловой насос), кг/ч;

$Y_1 = \{ t_{y1} ; G_{y1} \}$ – выходной вектор охлажденного молока;

t_{y1} – температура охлажденного молока, $^{\circ}\text{C}$;

G_{y1} – расход охлажденного молока, кг/ч;

$Y_2 = \{ t_{y2} ; G_{y2} \}$ – выходной вектор охлаждающей воды;

t_{y2} – температура воды на выходе из теплообменника, $^{\circ}\text{C}$;

G_{y2} – расход воды на выходе из теплообменника, кг/ч.

Выходные векторы Y_1 и Y_2 зависят от входных векторов F и U . Эта связь может быть выражена оператором W . Построение математической модели и ее технологического процесса заключается в установлении вида и структуры оператора, описывающего зависимость выходных параметров от входных:

$$Y = W [F, U] \quad (1)$$

При охлаждении молока получаем следующие выражения:

$$Y_1 = W_1 [t_f, G_f, t_u, G_u] \quad (2)$$

$$Y_2 = W_2 [t_f, G_f, t_u, G_u] \quad (3)$$

Функциональную схему охлаждения молока представляем на рисунке

2.

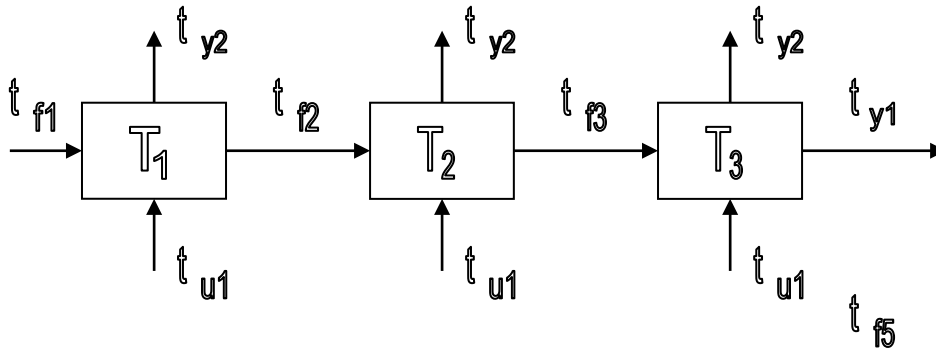


Рисунок 2 – Функциональная схема охлаждения молока пластинчатым охладителем: T1, T2, T3 – секции теплообменника

Представляем структурную схему математической модели нагрева воды охладителем:

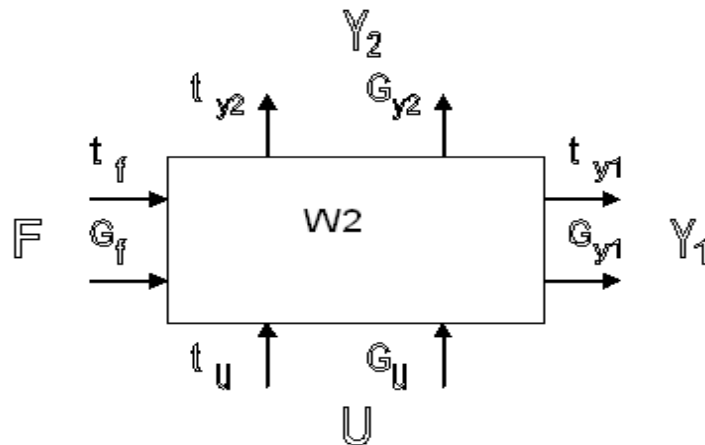


Рисунок 3 – Структурная схема математической модели нагрева воды

Эта модель представляет установку нагрева воды в виде системы, осуществляющей преобразование входных возмущающих и управляющих воздействий в выходные переменные параметры.

где: $F = \{ t_f ; G_f \}$ – входной вектор условий нагрева воды;

t_f – температура нагреваемой воды на входе в тепловой насос, $^{\circ}\text{C}$;

G_f – расход нагреваемой воды на входе в тепловой насос, кг/ч;

$U = \{ t_u ; G_u \}$ – входной вектор управления нагревом воды;

t_u – температура нагревающей воды на входе в тепловой насос, $^{\circ}\text{C}$;

G_u – расход нагревающей воды на входе в тепловой насос, кг/ч;

$Y_1 = \{ t_{y1} ; G_{y1} \}$ – выходной вектор нагреваемой воды;

t_{y1} – температура нагреваемой воды на выходе из теплового насоса, $^{\circ}\text{C}$;

G_{y1} – расход нагреваемой воды на выходе из теплового насоса, кг/ч;

$Y_2 = \{ t_{y2} ; G_{y2} \}$ – выходной вектор нагревающей воды;

t_{y2} – температура нагревающей воды на выходе из теплового насоса, °С;

G_{y2} – расход нагревающей воды на выходе из теплового насоса, кг/ч.

Получаем следующие зависимости для выходных векторов:

$$Y1 = W1 [tf, Gf, tu, Gu] ; \quad Y2 = W2 [tf, Gf, tu, Gu]$$

Пластинчатый теплообменник, использующий воду из артезианской скважины, может охладить молоко только до температуры 8°С, а по требованиям технологии по первичной обработке молоко требуется охладить до температуры 3-4°С. Для этой цели предлагаем использовать для охлаждения молока до 3-4°С тепловой насос.

Представляем математическую модель процесса работы теплового насоса для одновременного нагрева и охлаждения теплоносителей в виде динамической системы (рисунок 4).

Входной вектор $X1$ и выходной вектор $Y1$ относятся к возобновляемому источнику энергии:

$$X1 = \{qX1(\tau); GX1(\tau); tX1(\tau)\} \quad (4)$$

$$Y1 = \{qX2(\tau); GX2(\tau); tX2(\tau)\} , \quad (5)$$

где $qX1(\tau)$ - холодопроизводительность теплового насоса (количество тепла, отбираемого у возобновляемого источника энергии в единицу времени), кВт;

$GX1(\tau)$ - расход теплоносителя на входе в тепловой насос, м³/ч;

$tX1(\tau)$ – температура теплоносителя на входе в тепловой насос, °С;

$qX2(\tau)$ – количество тепла, оставшееся у теплоносителя, кВт;

$GX2(\tau)$ - расход теплоносителя на выходе из насоса, м³/ч;

$tX2(\tau)$ – температура теплоносителя на выходе из насоса, °С.

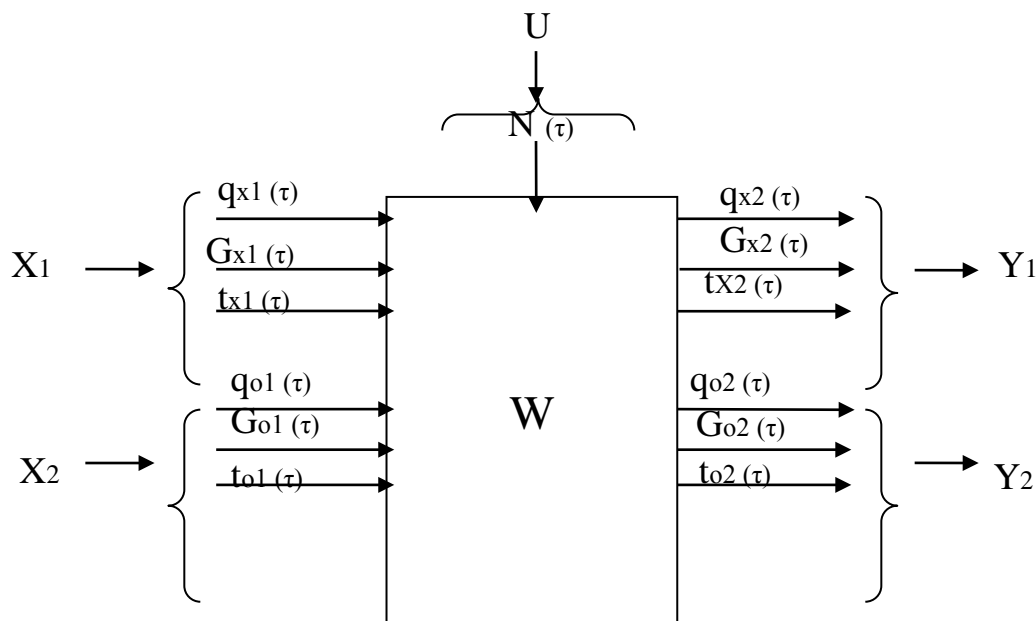


Рисунок 4 – Структурная схема математической модели процесса нагрева и охлаждения теплоносителей тепловым насосом

Входной вектор $X2$ и выходной вектор $Y2$ относятся к нагреваемому тепловым насосом теплоносителю:

$$X2 = \{q_{01}(\tau); G_{01}(\tau); t_{01}(\tau)\} \quad (6)$$

$$Y2 = \{q_{02}(\tau); G_{02}(\tau); t_{02}(\tau)\}, \quad (7)$$

где $q_{01}(\tau)$ – количество тепла, переносимое поступающим для нагревания теплоносителем на входе в тепловой насос, кВт;

$G_{01}(\tau)$ – расход нагреваемого теплоносителя на входе в насос, м³/ч;

$t_{01}(\tau)$ – температура нагреваемого теплоносителя на входе в насос, °С;

$q_{02}(\tau)$ – теплопроизводительность теплового насоса (количество тепла, передаваемое в единицу времени нагреваемому теплоносителю), кВт;

$G_{02}(\tau)$ – расход нагреваемого теплоносителя на выходе из насоса, м³/ч;

$t_{02}(\tau)$ – температура нагреваемого теплоносителя на выходе из насоса, °С;

Входной управляющий вектор U – это мощность компрессора N , кВт.

Главной задачей моделирования является получение математических зависимостей, связывающих основные характеристики работы теплового насоса: математических зависимостей для определения холодопроизводительности $q_{X1}(\tau)$, теплопроизводительности $q_{02}(\tau)$ и коэффициентов преобразования тепла и холода теплового насоса:

$$q_{X1}(\tau) = W1[N; q_{X1}(\tau); t_{X1}(\tau)] \quad (5)$$

$$q_{02}(\tau) = W2[N; G_{01}(\tau); t_{01}(\tau); t_{02}(\tau); G_{X1}(\tau); t_{X1}(\tau)] \quad (6)$$

Определяющим фактором работы теплового насоса является управляющий вектор – мощность компрессора N . Поэтому необходимо было также установить зависимость мощности компрессора от всех остальных характеристик работы теплового насоса:

$$N = W3[q_{X1}(\tau); q_{02}(\tau); G(\tau); G(\tau)] \quad (7)$$

Представляем функциональную схему математической модели охлаждения молока и нагрева воды с помощью теплового насоса.

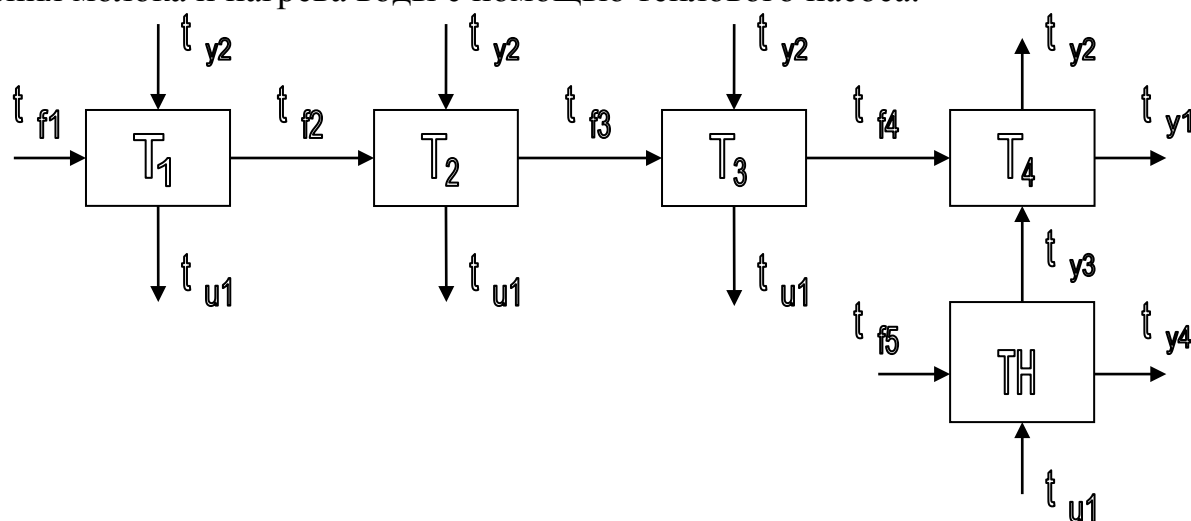


Рисунок 5 – Функциональная схема математической модели охлаждения молока и нагрева воды с помощью теплового насоса: T1, T2, T3, T4 – секции теплообменника; TH – тепловой насос

На основе математических моделей производится расчет термодинамических характеристик процесса охлаждения молока и нагрева воды. Целью расчета является определение площади поверхности теплообмена охладителя, мощности насосов, подающих молоко и грунтовую воду, мощности теплового насоса, также подбор оборудования.

Тепловой поток, отбираемый водой от молока, определяется по формуле:

$$Q = G_f C_f (t_f - t_{y1}), \quad (8)$$

где G_f — подача молока, м³/ч;
 c_f — теплоемкость молока, Дж/ кг·К;
 t_f и t_{y1} — начальная и конечная температуры молока, соответственно, °С.

Если пренебречь потерями тепла в окружающую среду, то это же количество теплоты приобретает вода:

$$Q = G_u c_u (t_{y2} - t_u), \quad (9)$$

где G_u — подача хладагента, м³/ч;
 c_u — его теплоемкость, Дж/ кг·К;
 t_{y2} и t_u — конечная и начальная температуры хладагента, соответственно, °С.

Процесс охлаждения в пластинчатых охладителях идет непрерывно, т.е. подача молока и хладагента осуществляется непрерывно. Но в зависимости от температурного режима охлаждающей жидкости требуется больше, чем охлаждаемой.

Определим коэффициент кратности расхода хладагента:

$$K_k = \frac{C_f (t_f - t_{y1})}{C_u (t_{y2} - t_u)}. \quad (10)$$

Поток тепла, проходящий через стенки охладителя, можно выразить уравнением Ньютона

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \cdot \tau \text{ Вт}, \quad (11)$$

где k — коэффициент теплопередачи через плоскую стенку, Вт/м²·К;
 F — общая теплообменная поверхность, м²;
 Δt_{cp} — средний градиент температур между теплообменными средами.

Приравняв (8) и (11), можно определить общую теплообменную поверхность:

$$F = \frac{G_f C_f (t_f - t_{y1})}{k \Delta t_{cp}}, \text{ м}^2 \quad (12)$$

Число рабочих пластин в секции (теплообменных поверхностей):

$$Z_{nl} = \frac{F}{f_{nl}} \quad (13)$$

где f_{nl} — площадь рабочей поверхности одной пластины, м².

Чтобы молоко успело охладиться до заданной температуры, оно должно находиться в охладителе определенное время τ . За это время оно отдает количество тепла, определяемого формулой Ньютона (формула 11).

Это же количество тепла можно представить как необходимое для охлаждения молока, находящегося одновременно в охладителе (количество каналов для молока $Z_{nl} / 2$)

$$Q = f_{nl} \Delta l \frac{Z_{nl}}{2} \rho_f C_f (t_f - t_{y1}) \text{ Дж} \quad (14)$$

где Δl — толщина зазора, по которому протекает молоко в охладителе, м;

f_{nl} — рабочая площадь пластины, м²,

$$f_{nl} = b h,$$

где b — ширина пластины, м;

h — высота пластины, м.

Приравняв формулы (11) и (14), определим время нахождения молока в охладителе

$$(15)$$

Время нахождения молока в охладителе должно быть не более 2 часов (ст. 6 Технического регламента на молоко и молочную продукцию, утвержденного Федеральным законом № 88-ФЗ от 12.06.2008 г.)

Количество единиц переноса тепла определим по формуле:

$$n = kF / W_{\min}, \quad (16)$$

где W_{\min} — наименьшая величина теплоемкости массового потока теплоносителя (произведение массового расхода теплоносителя G на его удельную теплоемкость C).

Или

$$n = \frac{\chi F}{W_{\min} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}. \quad (17)$$

где χ — коэффициент, учитывающий уменьшение коэффициента теплопередачи из-за термического сопротивления накипи и загрязнений;

α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи в теплообменнике

Тепловая эффективность оценивается отношением действительно передаваемой теплоты к теоретически возможной при нагревании теплоносителя:

$$\eta = \frac{W_1(t_{y1} - t_f)}{W_{\min}(t_u - t_f)} = \frac{W_2(t_u - t_{y2})}{W_{\min}(t_u - t_f)} \quad (18)$$

Суммарная мощность, расходуемая в теплообменнике, будет равна сумме мощностей N_1 и N_2 , расходуемых на перемещение обоих теплоносителей в каналах теплообменника.

$$N_1 = \frac{a}{\rho_1 c_1} W_1 \left(\frac{W_1}{V} \right)^q x_1^{q+1} = \frac{a \beta^q (x_{1W_1})^{q+1}}{\rho_1 c_1 F^q}, \quad (19)$$

$$N_2 = \frac{b}{\rho_2 c_2} W_2 \left(\frac{W_2}{V} \right)^m x_2^{m+1} = \frac{b \beta^m (x_{2W_2})^{m+1}}{\rho_2 c_2 F^m}, \quad (20)$$

$$\text{т. е.} \quad N = N_1 + N_2 = \frac{a\beta^q (Z_1 W_1)^{q+1}}{\rho_1 c_1 F^q} + \frac{b\beta^m (Z_2 W_2)^{m+1}}{\rho_2 c_2 F^m}, \quad (21)$$

где ρ_1, ρ_2 - средние значения плотностей теплоносителей, кг/м³;

$Z = \frac{t_{y2} - t_{y1}}{t_f - t_u}$ - температурный коэффициент;

X – число ходов теплоносителя в теплообменнике;

V – суммарный объем каналов, образованных поверхностью теплообмена, м³;

a, b – коэффициенты пропорциональности.

Определяющим фактором работы теплового насоса является управляющий вектор – мощность компрессора N. Установим зависимость мощности компрессора от всех остальных характеристик работы теплового насоса:

$$N = W_3 [q_{x1}(t); q_{02}(t); G(t)] \quad (22)$$

$$N = q_1 - q_2 \quad (23)$$

Коэффициент преобразования тепла:

$$K_T = \frac{q_1}{N} \quad (24)$$

Коэффициент преобразования холода:

$$K_x = \frac{q_2}{N} \quad (25)$$

Получим следующие формулы для коэффициентов преобразования:

$$K_{1T} = (G1C1(t1 - t_{11}))/((G1C1(t1 - t_{11}) - G2C2(t2 - t_{21}))) \quad (26)$$

$$K_{1x} = (G2C2(t2 - t_{21}))/((G1C1(t1 - t_{11}) - G2C2(t2 - t_{21}))) \quad (27)$$

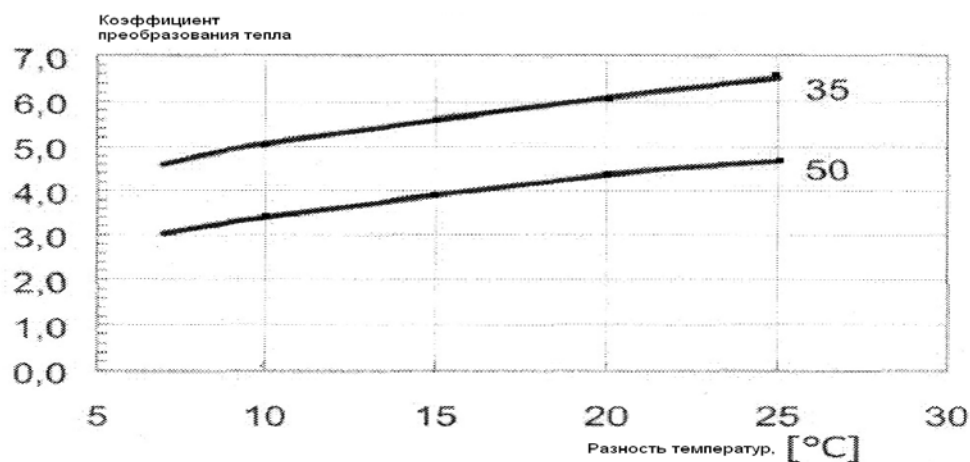


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента преобразования тепла от разности температур низкопотенциального источника тепла и высокопотенциального потребителя тепла

Произведя расчеты по полученным формулам, делаем следующие выводы: чем меньше разность температур между источником и приемником тепла, тем выше коэффициенты преобразования тепла и холода.

Поэтому оптимальными будут режимы работы теплового насоса при небольшой разности температур между источником и потребителем тепла.

Технико-экономические расчеты показывают, что тепловые насосы целесообразно использовать при разности температур между источником и потребителем тепла не более, чем 35...40 °С, чтобы получить коэффициент преобразования тепла 4...7.

В третьей главе «Программа и методика экспериментальных исследований» описана экспериментальная установка, использованные приборы и оборудование, представлена методика исследования и обработки данных.

В четвертой главе «Обоснование влияния конструктивных параметров и основных узлов на эффективность работы системы охлаждения» представлены основные технические показатели системы охлаждения молока, выбраны теплообменные пластины и уплотнительные прокладки, оптимизирован режим охлаждения теплоносителя хладон R 410A и параметры теплопередачи.

Основными показателями эффективности теплового насоса являются коэффициент преобразования тепла K_T и коэффициент преобразования холода K_x . Значения реальных коэффициентов получают в результате экспериментальных испытаний тепловых насосов и определяют по формулам (29) и (30).

Формула, связывающая два коэффициента преобразования тепла и холода для теплового насоса:

$$K_T = K_x + 1. \quad (28)$$

Идеальные значения коэффициентов определяются по обратному термодинамическому циклу Карно по следующим формулам:

Коэффициент преобразования тепла:

$$K_T = \frac{T_1}{T_1 - T_2}, \quad (29)$$

где T_1 – температура конденсации хладагента (температура потребителя тепла), К;

T_2 – температура испарения хладагента (температура источника низкопотенциальной энергии), К.

Коэффициент преобразования холода:

$$K_x = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \quad (30)$$

Чтобы перейти от идеальных коэффициентов к реальным, вводится коэффициент термодинамического совершенства h , величина которого для каждого теплового насоса определяется экспериментально.

Данные расчета тепловых и холодильных коэффициентов по формулам (29) и (30) с учетом степени термодинамического совершенства приведены в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициенты преобразования тепла и холода

№	T1, К	T2, К	K _T	K _x	Δt, °С	t2/t1
1	313	278	4,9	3,9	35	0,13
2	313	283	5,7	4,7	30	0,25
3	313	288	6,9	5,9	25	0,38
4	313	293	8,6	7,6	20	0,5
5	313	295	9,6	8,6	18	0,55
6	313	298	11,5	10,5	15	0,63

Для экономии ресурсов и получения максимальных коэффициентов преобразования тепла и холода требуется оптимизация режимов работы тепловых насосов в ограниченном диапазоне рабочих температур.

Для увеличения эффективности работы теплового насоса необходимо использовать методы оптимизации, одним из которых является золотое сечение.

На основании математической модели $Y_1 = W_1 [tf, Gf, tu, Gu]$; $Y_2 = W_2 [tf, Gf, tu, Gu]$ строим алгоритм реализации процесса охлаждения молока (рисунок 7).

На основании математической модели $Y_1 = W_1 [tf, Gf, tu, Gu]$; $Y_2 = W_2 [tf, Gf, tu, Gu]$ строим алгоритм реализации процесса нагрева воды (рисунок 8)

На основании математической модели $Y_1 = W_1 [F_1; F_2]$; $Y_2 = W_2 [F_1; F_2]$; $Y_1 = W_1 [t_{f1}; G_{f1}; t_{f2}; G_{f2}]$; $Y_2 = W_2 [t_{f1}; G_{f1}; t_{f2}; G_{f2}]$ строим алгоритм реализации процессов охлаждения молока и нагрева воды (рисунок 9)

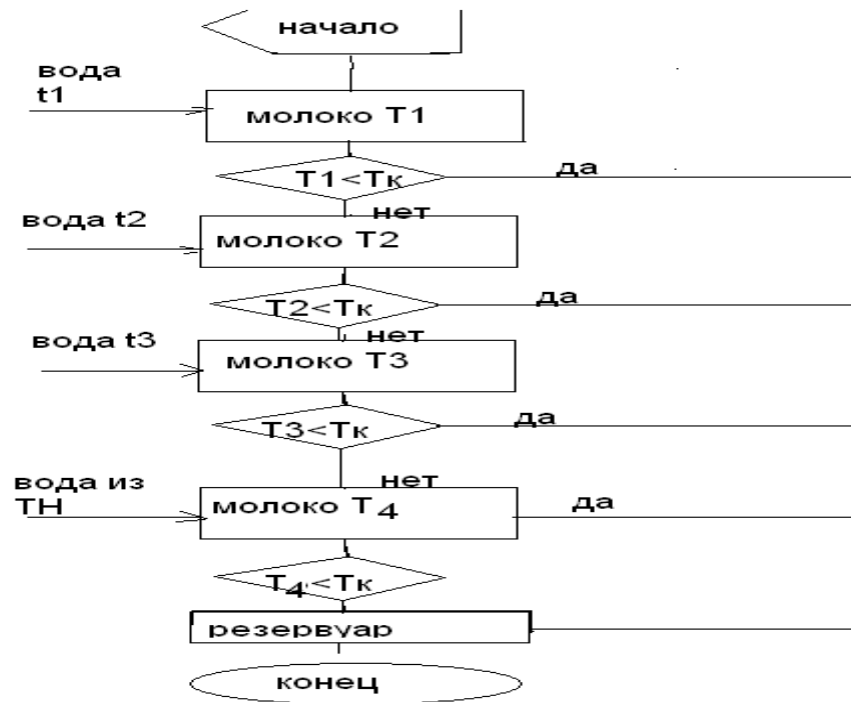


Рисунок 7 – Алгоритм реализации процесса охлаждения молока: T_k – конечная температура молока

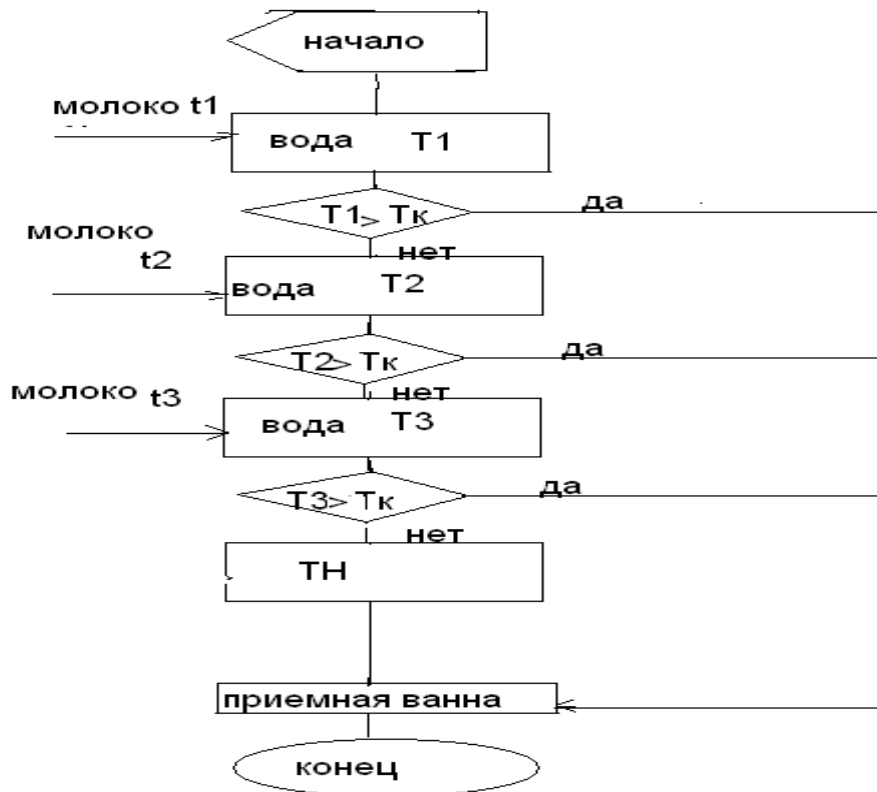


Рисунок 8 – Алгоритм реализации процесса нагрева воды

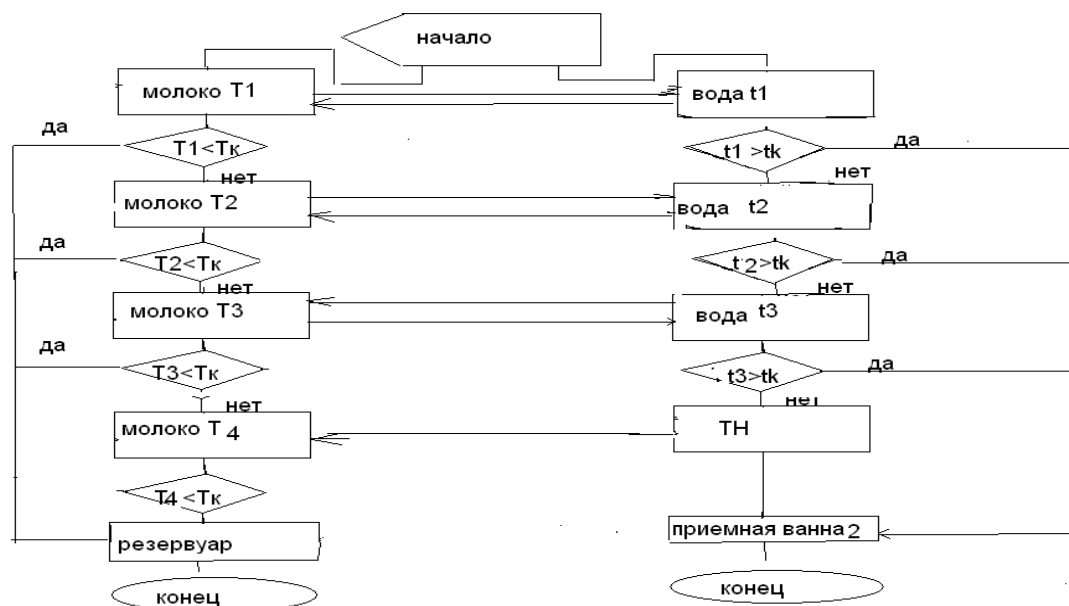


Рисунок 9 – Алгоритм реализации процессов охлаждения молока и нагрева воды.

На основании математической модели охлаждения молока и нагрева воды, а также алгоритмов реализации установки разрабатываем техническую реализацию установки.

В пятой главе «Результаты экспериментальных исследований» спроектировали процесс проведения эксперимента. При обработке результатов измерений и наблюдений используем таблицы и методы графического изображения.

Данные экспериментальных исследований представлены на графиках. График охлаждения молока представлен на рисунке 10

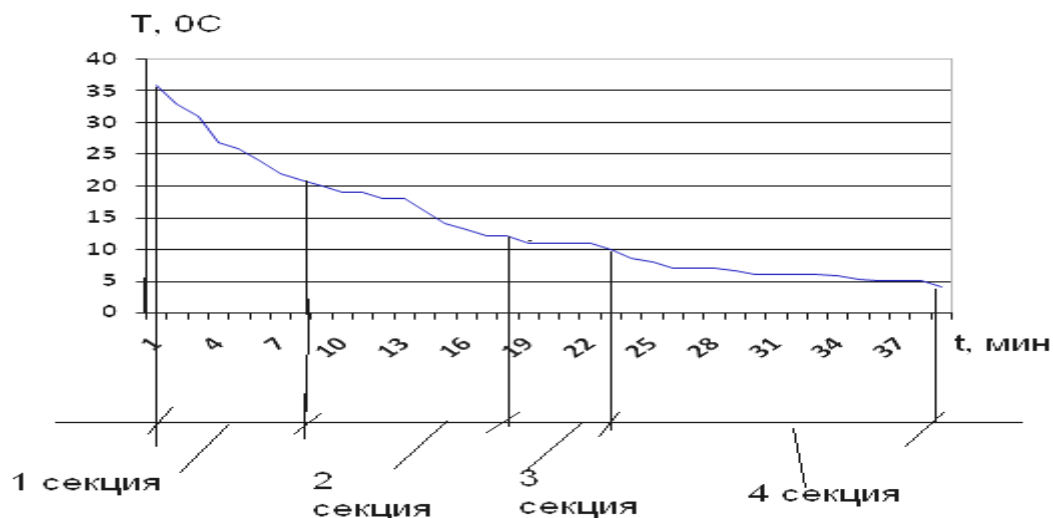


Рисунок 10 – График охлаждения молока

Графики нагрева воды представлены на рисунке 11.

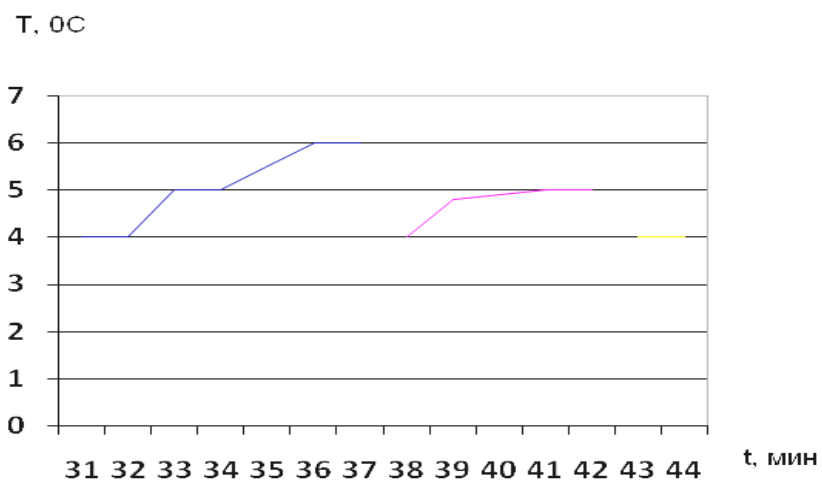
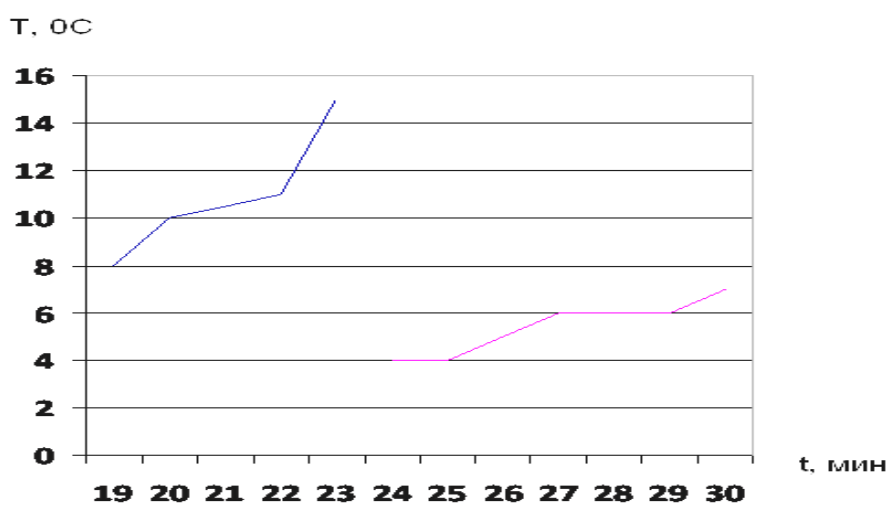
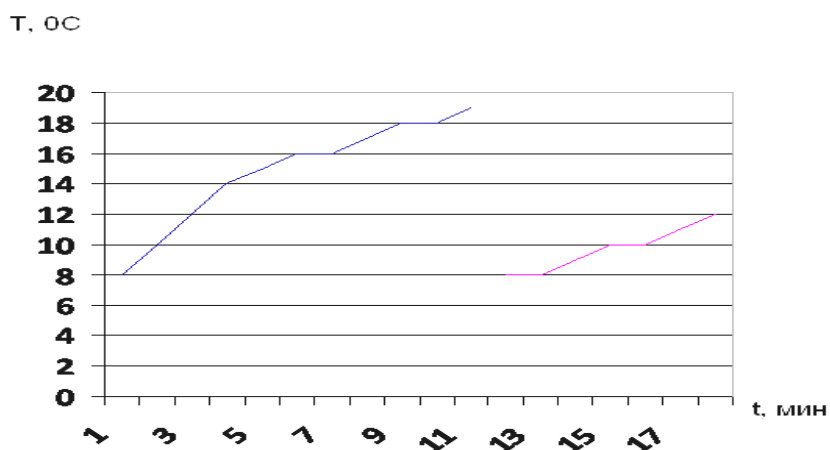


Рисунок 11 – Графики нагрева воды (3)

Полученные данные в результате экспериментальных исследований показали, что предлагаемая технологическая схема охлаждения молока и нагрева воды может быть применена на животноводческих комплексах АПК, так как показатели соответствуют требованиям Технического регламента на молоко и молочную продукцию.

Сводная информация о тепловых потоках и о коэффициентах преобразования теплового насоса в измеренных режимах работы экспериментальной установки приведена в таблице 2. Эти данные позволяют получить представление об эффективности тепловых процессов теплового насоса в зависимости от температур кипения и конденсации холодильного агента.

Таблица 2

Тепловые потоки и коэффициенты преобразования теплового насоса

Время измерений		q _{гр} , Вт	q _{то} , Вт	Δq, Вт	q _х , Вт	N, Вт	q _т , Вт	K _т
Дата	Время							
17.08.2010 г.	6:30	6,05	6,06	0,11	12,22	4,93	17,15	4,48
	7:45	5,56	6,45	0,12	12,13	4,93	17,07	4,46
	12:00	6,53	5,93	0,22	12,69	5,38	18,06	4,36
	13:20	5,32	7,09	0,25	12,66	5,38	18,04	4,35
	20:00	6,77	6,19	0,22	13,19	5,40	18,58	4,44
	22:05	5,08	5,93	0,25	11,26	5,38	16,64	4,09

Значения измеренного коэффициента преобразования находятся в диапазоне величин $2,75 < q < 4,61$, что отвечает известным представлениям об эффективности тепловых насосов, реализованных на других объектах.

Основные результаты испытания:

1. Технические решения установки обеспечения охлаждения молока и нагрева воды от теплового насоса, использующего низкопотенциальную энергию, продемонстрировали работоспособность экспериментальной установки и ее эффективность.

2. Температура молока 36 °С, и ее тепловой потенциал можно использовать через проточные теплообменники. Используя этот потенциал, обеспечиваем около 3/4 тепловой мощности теплового насоса.

3. Тепловой насос работал со средней величиной коэффициента преобразования 4,5, который является оптимальным для работы установки.

4. Совместная работа теплообменников в едином контуре циркуляции, работающем безостановочно,

предотвращает переохлаждение воды, который, при неработающем компрессоре теплового насоса прогревается водой из скважины, способствуя более эффективной выработке тепловой энергии.

5. При работе теплового насоса в течение 1ч температура этиленгликоля понижается до минимального значения -3°C . Среднее значение температуры охлажденной воды порядка 4°C .

6. Максимальная температура воды, подогретая в теплообменнике ТН $+45^{\circ}\text{C}$.

7. Время выхода установки на стационарный температурный режим около получаса

8. Информации, полученной в результате испытания установки, достаточно для того, чтобы на ее основе проектировать энергоэффективные установки охлаждения молока и нагрева воды.

В шестой главе «Оценка технико-экономической эффективности энергосберегающей технологии охлаждения молока и нагрева воды» проведены основные расчеты, доказывающие экономическую целесообразность применения данной технологии охлаждения молока и нагрева воды.

Рассчитаны затраты на электроэнергию при использовании предлагаемой технологии, которые сравнили с затратами при базовом варианте, когда для охлаждения молока используют танки-охладители, которые применяются на животноводческих фермах. Рассчитаны капитальные вложения, дополнительные затраты, чистый доход и срок окупаемости технологии.

Результаты расчета технико-экономической эффективности энергосберегающей технологии сведем в таблицу 3.

Таблица 3

Результаты экономической эффективности

Показатели	Базовый вариант	Предлагаемый вариант	+/- к базовому варианту
Капитальные затраты, руб.	988826,3	121884	- 866942,3
Затраты электроэнергии, кВт·ч	947760	10950	-936810
Затраты на электроэнергию, руб.	2871712,8	33178,5	-2838534,3
Дополнительные затраты на содержание оборудования:			
- ремонт и техническое обслуживание;	48104,76	4320	-43784,76
- амортизация	57319,96	6120	- 51199,96

Продолжение таблицы 3

Срок окупаемости, лет			0,8
Чистый доход, руб.			165611,5
Интегральный экономический эффект с учетом фактора времени, руб.			471005,17
Дисконтированный срок окупаемости, лет			1,03

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Анализ известных зарубежных и отечественных установок охлаждения молока на животноводческом комплексе показал, что наибольшие энергозатраты приходят на технологический процесс первичной обработки молока, то есть его охлаждение.

2. Разработаны математические модели технологических процессов охлаждения молока и нагрева воды (рис. 2.1, 2.3, 2.4), алгоритмы технологического процесса работы установки охлаждения молока и нагрева воды (рис. 4.6...4.8), на основании которых приводится управление системой охлаждения молока и нагрева воды.

3. В соответствии с моделью разработан метод и критерий оптимизации параметров охлаждения молока и нагрева воды выбраны: коэффициенты преобразования тепла и холода ($K_T=4...7$, $K_X=3...6$).

4. Разработана схема технологического процесса охлаждения молока и нагрева воды, позволяющая получать молоко в соответствии с требованиями Технического регламента на молоко и молочную продукцию ($t=4^{\circ}\text{C}$), (рис. 5.1).

5. Оптимизированы параметры теплопередачи установки и режим охлаждения и нагрева теплоносителя (коэффициенты преобразования тепла и холода: $K_T=4...7$; $K_X=3...6$, температурный диапазон $35...45^{\circ}\text{C}$), даны рекомендации по применению теплоносителя хладон R410A. На основании экспериментальных данных получены зависимости температуры охлаждаемого молока и нагреваемой воды от времени (рис. 5.2...5.3), удовлетворяющие требованиям Регламента на молоко и молочную продукцию ТР ИСВН 978-5-16-003503-1.

6. Энергосберегающая технология охлаждения молока и нагрева воды позволит сельскохозяйственному предприятию снизить затраты электроэнергии на 936810 кВт. Общий экономический эффект составит 2838534,3 руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в журналах, рекомендованных ВАК:

1. **Шешунова, Е.В.** Энергосберегающая технология охлаждения молока / С.А. Краснов, П.С. Орлов, Е.В. Шешунова // журнал «Сельский механизатор» - Москва, ООО «Нива». – 2010, № 9.

2. **Шешунова, Е.В.** Теоретическое обоснование оптимальных режимов работы теплового насоса на основе метода золотого сечения / С.А. Краснов, И.В. Кряклина // журнал «Естественные и технические науки» - Москва. – 2011. - №5.

3. **Шешунова, Е.В.** Повышение эффективности охлаждения молока // И.В. Кряклина, Е.В. Шешунова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2012. - №1.

4. **Шешунова, Е.В.** Получение тепла и холода для животноводческого комплекса с использованием высокоэффективной энергосберегающей технологии // С.А. Краснов, И.В. Кряклина, В.С. Смурыгин // // Современные проблемы науки и образования. – 2012. - №1.

5. **Шешунова, Е.В.** Использование геотермального тепла с применением теплового насоса на животноводческой ферме // Современные проблемы науки и образования. – 2012. - №2.

Публикации в других изданиях:

6. **Шешунова, Е.В.** Возобновляемые источники энергии, экология и энергоэффективность / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов, И.В. Кряклина // Ярославское региональное отделение Международной Академии Информатизации. – Ярославль, 2012. – 209 с.

7. **Шешунова, Е.В.** Использование: теория нечетких множеств в управлении тепловым насосом / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов, И.В. Кряклина // Ярославское региональное отделение Международной Академии Информатизации. – Ярославль, 2012. – 9 с.

8. **Шешунова, Е.В.** Использование теплового насоса на животноводческой ферме для получения холода и тепла / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов, И.В. Кряклина // Ярославское региональное отделение Международной Академии Информатизации. – Ярославль, 2012. – 8 с.

9. **Шешунова, Е.В.** Использование тепловых насосов для охлаждения молока / Е. В. Шешунова // Журнал «Вестник АПК Верхневолжья» - Ярославль: ЯГСХА, 2008, № 3.

10. **Шешунова, Е.В.** Курсовое и дипломное проектирование по механизации, электрификации и автоматизации в животноводстве. Учебное пособие / Е.В. Шешунова [и др.]. – Ярославль, ФГОУ ВПО ЯГСХА. – 205 с.

11. **Шешунова, Е.В.** Нагрев воды для технологических целей на комплексах крупного рогатого скота с использованием тепловых насосов / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов, И.В. Кряклина // Ярославское региональное отделение Международной академии информатизации. – Ярославль: МАИ, 2010. – 7 с.: ил.

12. **Шешунова, Е.В.** Охлаждение молока и нагрев воды с помощью теплового насоса / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов, И.В. Кряклина //

Ярославское региональное отделение Международной академии информатизации. – Ярославль: МАИ, 2010. – 9 с.: ил.

13. **Шешунова, Е.В.** Охлаждение молока с использованием теплообменников и теплового насоса / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов, И.В. Кряклина // Ярославское региональное отделение Международной академии информатизации. – Ярославль: МАИ, 2010. – 8 с.: ил.

14. **Шешунова, Е.В.** Оценка экономической эффективности энергосберегающей технологии, используемой для охлаждения молока и нагрева воды / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов, В.А. Медянцев // Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 115-летию Т.С. Мальцева «Развитие научной, творческой и инновационной деятельности молодежи». – Курган: из-во Курганской ГСХА, 2010. С.418-421.

15. **Шешунова, Е.В.** Оценка энергозатрат технологии охлаждения молока с использованием теплового насоса / Е.В., Шешунова, С.А. Краснов, В.А. Медянцев // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей «Науке нового века – знания молодых», 3 ч. Ч.II. Биологические, ветеринарные и технические науки– Киров: «Вятская ГСХА», 2011. С. 181-186.

16. **Шешунова, Е.В.** Состояния проблемы энергоресурсосбережения для концепции интеллектуального дома / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов, И.В. Кряклина // Ярославское региональное отделение Международной Академии Информатизации. – Ярославль, 2012. – 12 с.

17. **Шешунова, Е.В.** Тепловой расчет теплообменников и эффективность применения тепловых насосов / Е.В. Шешунова // Сборник научных трудов по материалам XIV международной научно-практической конференции «Инновационные направления развития АПК и повышение конкурентоспособности предприятий, отраслей и комплексов – вклад молодых ученых». – Ярославль: Из-во ФГОУ ВПО «Ярославская ГСХА», 2011. С. 74-79.

18. **Шешунова, Е.В.** Установка непосредственного охлаждения молока / Е.В. Шешунова // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы инженерного обеспечения АПК». – Ярославль: Из-во ФГОУ ВПО «Ярославская ГСХА», 2003. С. 202-208.

19. **Шешунова, Е.В.** Энергосберегающая технология охлаждения молока / Е.В. Шешунова, И.В. Кряклина // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник статей: в 3 кн / VII Международная научно-практическая конференция. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2012. Кн. 3.

20. **Шешунова, Е.В.** Эффективность энергосбережения при использовании тепловых насосов для охлаждения молока / Е.В. Шешунова // Сборник научных трудов 30-юбилейной Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы инженерного обеспечения АПК». – Ярославль: Из-во ФГОУ ВПО «Ярославская ГСХА», 2007. С. 57-60.

21. **Шешунова, Е.В.** Энергосберегающие технологии, применяемые для охлаждения молока с использованием тепловых насосов / Е.В. Шешунова, С.А. Краснов. // Материалы XI Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Вклад молодых ученых в реализацию приоритетного национального проекта «Развитие агропромышленного комплекса», II том: Сб. науч. тр. – Троицк: УГАВМ, 2007. – С. 152-156.

22. **Шешунова, Е.В.** Оптимизация расчета процесса нагрева и охлаждения /С.А. Краснов, И.В. Кряклина // журнал «Вестник АПК Верхневолжья». – Ярославль. – 2011. - №4.