

УДК 637.117.02

## ПРИМЕНЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО ХОЛОДА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА

*Ливий ВОЛКОНОВИЧ<sup>1</sup>, Михаил КУШНИР<sup>1</sup>, Аугустин ВОЛКОНОВИЧ<sup>2</sup>,  
Александр УЧЕВАТКИН<sup>2</sup>, Наталья КУШНИР<sup>1</sup>, Викторин СЛИПЕНКИ<sup>1</sup>,  
Анатол ДАЙКУ<sup>1</sup>, Онорин ВОЛКОНОВИЧ<sup>1</sup>, Александр Пона<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Государственный Аграрный Университет Молдовы

<sup>2</sup>Министерство Сельского Хозяйства, Регионального Развития и Среды Республики Молдова

**Abstract.** Mathematical models of the processes of cold accumulation and milk cooling by water-ice accumulators of seasonal and year-round action in heat exchangers of flow and capacitive types have been developed, in order to ensure the functioning of the line in an optimal energy regime with new technical means, and to substantiate the main parameters of energy-saving systems of milk cooling. These tasks are solved in the context of the system approach using the theory of operations, probability theory and mathematical statistics, automatic control theory, mathematical and physical modeling, and the analysis and synthesis of electrical equipment.

**Key words:** Milk cooling; Energy-saving technological processes; Natural cold; Artificial cold; Seasonal action units; Combined action installations; Flow-through cooler; Capacitive cooler.

**Реферат.** В данной работе разработаны математические модели процессов аккумуляции холода и охлаждения молока водо-ледяными аккумуляторами сезонного и круглогодичного действия в теплообменниках проточного и емкостного типов с целью обеспечения функционирования линии в оптимальном энергетическом режиме с новыми техническими средствами и с целью обоснования основных параметров энергосберегающих систем охлаждения молока. Поставленные задачи решены с позиций системного подхода с использованием теории операций, теории вероятностей и математической статистики, теории автоматического регулирования, математического и физического моделирования, анализа и синтеза системы электрооборудования.

**Ключевые слова:** Охлаждение молока; Энергосберегающие технологические процессы; Естественный холод; Искусственный холод; Установки сезонного действия; Установки комбинированного действия; Проточный охладитель; Емкостной охладитель.

### ВВЕДЕНИЕ

Дальнейшее наращивание производства молока и повышение эффективности процессов его обработки в условиях нынешнего материально-энергетического обеспечения хозяйств требуют вовлечения в энергетический баланс природных естественных источников энергии, создания и внедрения гибких энергосберегающих линий с различным уровнем автоматизации в зависимости от типоразмера ферм, принятой технологии и географии расположения ферм.

Использованию естественного холода для охлаждения и хранения молока и других сельскохозяйственных продуктов посвящено большое количество работ. Исследования показали, что выполненные разработки в большинстве случаев носили некомплексный характер. Не нашли должного отражения вопросы эффективности совместного использования для охлаждения молока источников естественного и искусственного холода. В условиях больших колебаний независимых входных параметров (температура воздуха и воды, количество охлаждаемого молока и его начальная температура) повысить эффективность функционирования подобных систем без автоматизации невозможно (Мусин, А., Марьяхин, Ф. и др. 2006; Учеваткин, А. 2008).

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу разработки автоматизированных энергосберегающих технологий, технических средств и унифицированной системы электрооборудования (СЭ) положен методологический прием, в соответствии с которым энергосберегающие технологические линии рассмотрены как единая сложная система взаимодействия множества элементов - технологических, энергетических, эксплуатационных факторов, влияющих на качество молока и на технико-экономические показатели фермы.

Поставленные задачи решены с позиций системного подхода с использованием теории операций, теории вероятностей и математической статистики, теории автоматического регулирования, математического и физического моделирования, анализа и синтеза СЭ (Мусин, А., Марьяхин, Ф. и др. 2006; Учеваткин, А. 2008).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В зависимости от принципа действия и способа использования естественного и искусственного холода системы охлаждения молока и установки, аккумулирующие холод в виде льда и ледяной воды, делятся на две группы: сезонного (УСД) (рис. 1), и круглогодочного действия. Установки круглогодочного действия делятся в свою очередь на комбинированные установки (УКД) (рис. 2) и аккумуляторы-льдохранилища (ЛХ) (рис. 3).

Установки сезонного действия функционируют только в холодное время года и представляют собой секционированный приемник - аккумулятор естественного холода, устанавливаемый снаружи около помещения для обработки и хранения молока. В холодное время года вода насосом подается в проточный теплообменник. Внутри УСД размещена система труб и перегородок, обеспечивающая циркуляцию воды при образовании льда.

В установках комбинированного действия (УКД) применяется как естественный, так и искусственный холод. В зимний период она работает как УСД, в летний период - подзарядная холодильная установка во время пауз между дойками заряжает холодом УКД, который затем используется для охлаждения молока. В качестве подзарядных могут использоваться холодильные установки типа АВ-30, ТХУ-23, ТХУ-14, МВТ-20, МВТ-14, МКТ-20, УВ-10, ОТ-10, ФУ-40 и др. (Учеваткин, А. 2008; Волконович, Л., Сырги, К. 2002).

В аккумуляторах-льдохранилищах подзарядные холодильные установки не используются. В холодный период лед накапливается путем послойного его намораживания, а в теплое время года его используют для охлаждения молока.

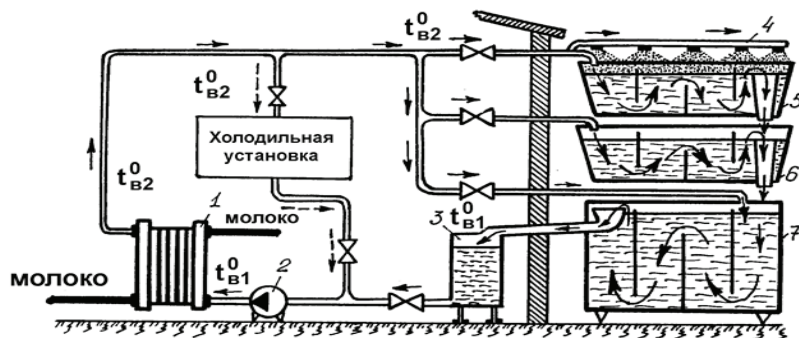
Применение энергосберегающих систем и технических средств с использованием естественного холода, характеризующееся качественными изменениями в технологии охлаждения, сопровождается усложнением функционально-структурной организации линий и алгоритма управления технологическим процессом обработки молока. Многообразие возмущений, изменяющихся в процессе функционирования системы по случайному закону (например, интенсивность потоков молока  $Q_n$  и хладоносителя  $Q_x$ , температура молока  $t_{ml}$ , хладоносителя  $t_{vl}$  и окружающего воздуха  $t_{\circ}$  и др.), и сложные взаимосвязи в ходе процесса обработки между звеньями и СЭ порождают множество энергетических и информационных потоков в системе. При этом возрастает количество контролируемых и регулируемых параметров и соответственно логических операций, которые необходимо выполнять при осуществлении управления процессом обработки молока. В связи с расширением номенклатуры машин и оборудования, а также разнообразием технологических схем, большое значение приобретает типизация и унификация алгоритмов управления, технических средств и электрооборудования технологических линий. (Учеваткин, А. 2008; Волконович, Л., Сырги, К. 2002; Кушнир, М. 2015).

Так как основной технологический процесс обработки молока остается, то и технологическая схема в своей основе остается прежней. На отдельных участках и операциях она изменяется либо дополняется новыми участками. В таких условиях наилучшим решением является дополнение основных технологических схем специализированными конструктивными модулями, предназначенными для улучшения качества функционирования по технологическим, энергетическим, экологическим и эксплуатационным характеристикам или устранения определенного вида возмущения. Такие модули обладают гибкой структурой и хорошо сопрягаются с основным оборудованием без его существенной переделки. На рис. 4 представлена структура энергосберегающей технологической линии первичной обработки молока на фермах, которая построена на основе типовых технологических участков и операций и дополнена конструктивными модулями (выделено жирными линиями), содержащими одну или несколько операций, например, перекачка молока и его учет, аккумулярование естественного и искусственного холода, распыление хладоносителя и т.п.

В соответствии с модульным принципом функционально-структурной организации технологических систем новое оборудование представлено и реализовано в виде конструктивного модуля - элемента технической системы, обладающей технологической и функциональной завершенностью, универсальностью применения и совместимостью с другими модулями. Модульный принцип функционально-структурной организации технологических систем и технических средств дает возможность использовать преимущества блочной унификации и позволяет формировать

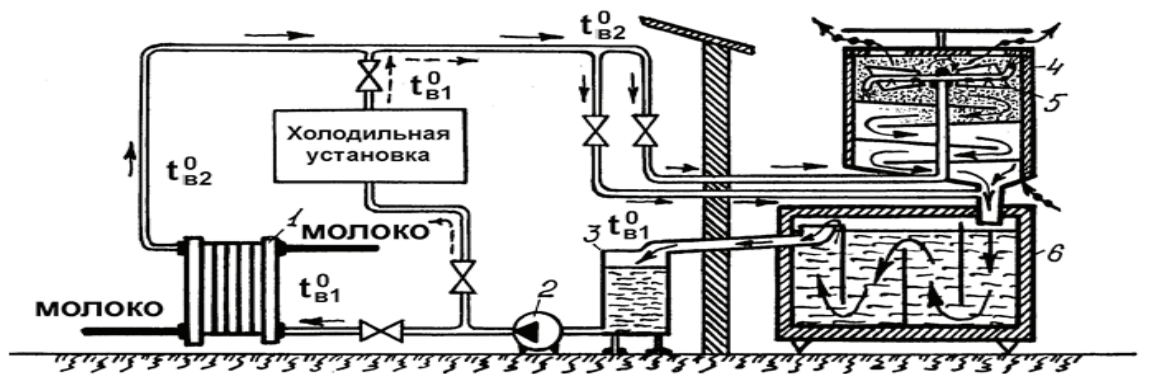
гибкие энергосберегающие линии обработки молока с требуемыми параметрами и характеристиками для любых типов животноводческих ферм с потенциальным расширением их функциональных возможностей при изменении задач. При этом существенно упрощаются расчеты, и количественная оценка отдельных звеньев и линии в целом и тем самым резко снижается трудоемкость поиска оптимальных решений.

В основу математического описания функционально-структурной организации системы положено обобщенное дерево функций и структура автоматизированных энергосберегающих линий обработки молока с учетом вариантов комплектации техническими средствами и существующими типовыми схемами.



**Рисунок 1.** Технологическая схема энергосберегающей системы охлаждения молока с использованием установок сезонного действия (УСД)

1 - проточный охладитель; 2 - насос; 3 - промежуточный резервуар; 4 - распылительный блок аккумулятора естественного холода (АЕХ); 5 - верхний резервуар АЕХ; 6 - средний резервуар АЕХ; 7 - нижний резервуар АЕХ. —> - хладоноситель; - - -> - хладоноситель от холодильной установки.



**Рисунок 2.** Технологическая схема энергосберегающей системы охлаждения молока с использованием установок комбинированного действия (УКД)

1 - проточный охладитель; 2 - насос; 3 - промежуточный резервуар; 4 - распылительный блок; 5 - распылительные трубы с аэродинамическими пластинами; 6 - аккумулятор естественного и искусственного холода. —> - хладоноситель; - - -> - воздух; . . .> - режим аккумуляции искусственного холода.

В результате сформированы основные типовые варианты автоматизированных энергосберегающих технологических линий для различных ферм, отличающихся поголовьем и продуктивностью коров, принятой технологией, а также архитектурно-планировочными решениями.

Эти варианты являются модификацией известных типовых вариантов, в которые добавлены новые модули (звенья), в т. ч. использующие естественный холод. Унифицированный комплект электрооборудования таких линий позволит перекрыть все возможное многообразие и множество технологических вариантов оборудования, действующего на территории Республики Молдова.

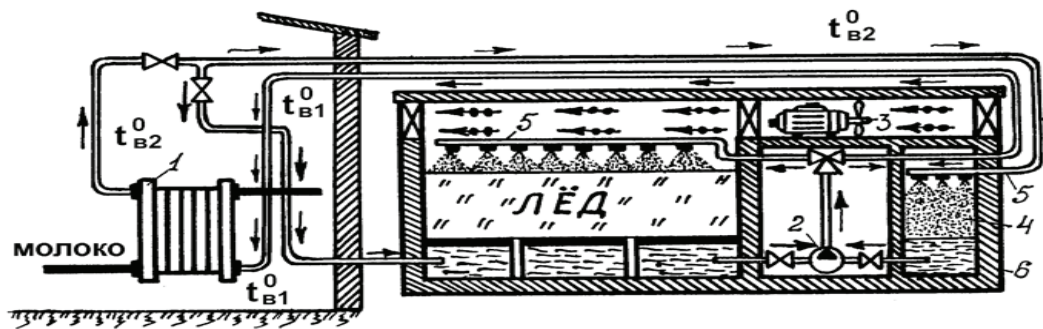


Рисунок 3. Технологическая схема энергосберегающей системы охлаждения молока с использованием аккумулятора -льдохранилища (ЛХ)

1 - проточный охладитель; 2 - насос; 3 - вентилятор; 4 - распылительный блок; 5 - распылительные трубы; 6 - льдохранилище.  $\longrightarrow$  - хладоноситель;  $\longrightarrow$  - воздух.

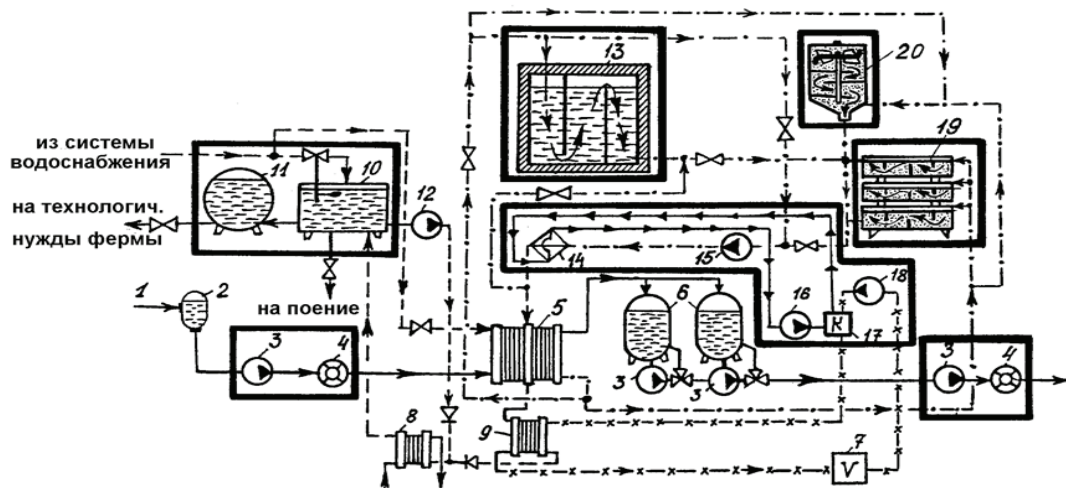


Рисунок 4. Структура автоматизированной энергосберегающей технологической линии обработки молока

1 - молокопровод; 2 - молокосорбник-воздухоразделитель; 3 - молочный насос; 4 - счетчик молока; 5 - проточный охладитель; 6 - резервуар-термос; 7 - емкость для охлаждения конденсатора холодильной установки (ХУ); 8,9 - теплообменники первой и второй ступени; 10 - резервуар теплой воды с поплавковым регулятором; 11- водонагреватель; 12 - водяной насос; 13 - аккумулятор естественного и искусственного холода (АЕИХ); 14 - испаритель ХУ; 15 - насос хладоносителя; 16 - компрессор ХУ; 17 - конденсатор ХУ; 18 - насос системы охлаждения конденсатора ХУ; 19 - секционный аккумулятор естественного холода (АЕХ); 20 - распылительный блок.

$\longrightarrow$  молоко;  $\cdots\cdots\cdots$  хладоноситель от АЕХ;  $----$  хладоноситель от холодильной установки и АЕИХ;  $-x-x-x-x-x-$  оборотная вода системы охлаждения конденсатора;  $\text{—}$  хладоагент.

Для обеспечения функционирования линии в оптимальном энергетическом режиме с новыми техническими средствами и обоснования основных параметров энергосберегающих систем охлаждения молока, разработаны математические модели процессов аккумуляции холода и охлаждения молока водо-ледяными аккумуляторами сезонного и круглогодичного действия в теплообменниках проточного и емкостного типов. Исследованы и обоснованы эффективные способы и режимы аккумуляции естественного и искусственного холода, приведена методика расчета и обоснования параметров и режимов работы системы охлаждения молока с использованием естественного и искусственного холода на базе установок сезонного действия (УСД), комбинированного действия (УКД) и аккумуляторов-льдохранилищ (ЛХ) (рис.1...3). Теоретически и экспериментально исследованы два основных режима функционирования и

подзарядки установок: режим смешивания, при котором происходит перемешивание хладоносителя с отепленной водой, и температура хладоносителя во всем объеме быстро выравнивается; режим вытеснения, при котором, хладоноситель, подаваемый снизу, не перемешиваясь с теплой, вытесняет ее. Температура воды в верхних слоях оказывается выше, чем в нижних (Волконович, Л., Сырги, К. 2002; Кушнир, М. 2015).

Для рационального сочетания использования естественного и искусственного холода в различных климатических зонах Республики Молдова, разработана методика расчета и обоснования параметров и режимов работы системы охлаждения молока, позволяющая определить наиболее эффективный вариант энергосберегающей системы охлаждения в зависимости от варианта комплектации линии оборудованием (техническими средствами)  $N_{\text{в}}$  и средней годовой температуры наружного воздуха  $\Delta^{\circ}\text{C}$  в зоне расположения объекта. Степень использования потенциала природного холода и рациональное сочетание естественного и искусственного холода в технологических линиях в суточном и годовом циклах определены при помощи энергосберегающего модуля  $K_{\text{в}}$  и номограммы, построенной в координатах  $K_{\text{в}} - n_{\text{в}} - \Delta^{\circ}\text{C}$

$$K_{\text{в}} = Q_{\text{и}} / Q_{\text{ех}}, \quad (1)$$

где  $Q_{\text{и}}$ ,  $Q_{\text{ех}}$  – хладопроизводительность соответственно источника искусственного и естественного холода, кВт.

Требуемая мощность подзарядной холодильной установки  $N_{\text{и}}$  источника искусственного холода  $Q_{\text{и}}$  в зависимости от вместимости аккумуляторов естественного и искусственного холода  $V_{\text{ах}}$ , определена из номограммы, построенной в координатах  $Q_{\text{и}} - N_{\text{и}} - V_{\text{ах}}$ .

Для обоснования параметров и эффективных режимов работы энергосберегающей системы охлаждения с УСД, УКД и ЛХ исследованы два основных режима:

- режим охлаждения молока с использованием аккумуляторов естественного и искусственного холода (АХ)

$$K_{\text{в}} = f(t^{\circ}\text{м1}, t^{\circ}\text{м2}, t^{\circ}\text{в1}, t^{\circ}\text{в2}, t^{\circ}\text{о}, q_{\text{ах}}, T_{\text{о}}, M_{\text{м}}), \quad (2)$$

где  $K_{\text{в}}$  - соотношение (кратность) количества воды (хладоносителя) в аккумуляторе холода  $V_{\text{ах}}$  к количеству охлаждаемого молока  $M_{\text{м}}$ ;  $t^{\circ}\text{м1}$  - начальная температура молока, до охлаждения,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t^{\circ}\text{м2}$  - конечная температура молока, после охлаждения,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t^{\circ}\text{в1}$  - температура хладоносителя на входе теплообменника (охладителя) или на выходе аккумулятора холода и испарителя холодильной установки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t^{\circ}\text{в2}$  - температура хладоносителя на выходе из теплообменника молока,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t^{\circ}\text{о}$  - температура атмосферного (наружного) воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_{\text{ах}}$  - производительность насоса хладоносителя АХ, ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );  $T_{\text{о}}$  - время охлаждения молока, ч;  $M_{\text{м}}$  - количество охлаждаемого молока,  $\text{м}^3$ ;

режим аккумуляции естественного и искусственного холода

$$Q_{\text{с}} = f(t^{\circ}\text{м1}, t^{\circ}\text{в1}, t^{\circ}\text{в2}, t^{\circ}\text{о}, q_{\text{ах}}, T_{\text{п}}, T_{\text{а}}, M_{\text{м}}, a, b, h), \quad (3)$$

где:  $Q_{\text{с}}$  - хладопроизводительность системы, ЛХ или подзарядной холодильной установки, тыс. ккал/ч;  $T_{\text{п}}$  - время паузы между дойками, ч;  $T_{\text{а}}$  - время аккумуляции холода, ч;  $a$  и  $b$  - соответственно, длина и ширина зеркала ЛХ, м;  $h$  - толщина намораживаемого слоя льда, м;

При реализации на ЭВМ математических моделей процессов аккумуляции холода и охлаждения молока водо-ледяными АХ установлены количественные взаимосвязи между температурами обрабатываемого молока ( $t^{\circ}\text{м1}$ ,  $t^{\circ}\text{м2}$ ), хладоносителя ( $t^{\circ}\text{в1}$ ,  $t^{\circ}\text{в2}$ ), атмосферного воздуха  $t^{\circ}\text{о}$ , временем охлаждения  $T_{\text{о}}$  и аккумуляции холода  $T_{\text{а}}$  и конструктивно-технологическими параметрами АХ:

**в линиях с проточными теплообменниками:**

- режим смешивания хладоносителя в АХ

$$\begin{aligned} K_{\text{в}} &= V_{\text{ах}} / M_{\text{м}} = [\ln(t^{\circ}\text{м1} - t^{\circ}\text{о} - 2) / (t^{\circ}\text{м1} - t^{\circ}\text{в1} - 2)]^{-1} \geq 3.0; \text{ при } t^{\circ}\text{м1} = 17^{\circ}\text{C}, t^{\circ}\text{м2} \leq 6^{\circ}\text{C}; \\ t^{\circ}\text{в1} &= t^{\circ}\text{м1} - 2 - (t^{\circ}\text{м1} - t^{\circ}\text{о} - 2) \exp(-1 / K_{\text{в}}) \approx 2,4^{\circ}\text{C}; t^{\circ}\text{в2} = (t^{\circ}\text{м1} + 2t^{\circ}\text{в1} - 2) / 3; \\ q_{\text{ах}} &= K_{\text{в}} \cdot M_{\text{м}} / 4 \cdot [\ln(t^{\circ}\text{в2} - 2) / (t^{\circ}\text{в1} - 2)] \approx 2.1 \cdot M_{\text{м}}; \end{aligned} \quad (4)$$

- режим вытеснения хладоносителя в АХ

$$\begin{aligned} K_{\text{в}} &= V_{\text{ах}} / M_{\text{м}} = [3(t^{\circ}\text{м1} - 6) / (t^{\circ}\text{м1} - t^{\circ}\text{в1} - 2)] = 2,6; \text{ при } t^{\circ}\text{м1} = 17^{\circ}\text{C}, t^{\circ}\text{м2} \leq 6^{\circ}\text{C}; \\ t^{\circ}\text{в1} &= 2^{\circ}\text{C}; t^{\circ}\text{в2} = (t^{\circ}\text{м1} + 2 \cdot t^{\circ}\text{о} - 2) / 3 - \text{ для первого цикла охлаждения}; \\ t^{\circ}\text{в2} &= 1/3 \cdot [(t^{\circ}\text{м1} - 2) \cdot (1 + 2/3 + 2^2/3^2 + \dots + 2^{n-2}/3^{n-2}) + (t^{\circ}\text{м1} + t^{\circ}\text{о} - 2) \cdot 2^{n-2}/3^{n-2}] \approx 5,8^{\circ}\text{C}; \\ n &= (2, 3, 4, 5 \dots) - \text{ циклы функционирования} \end{aligned} \quad (5)$$

$$q_{ax} = V_{ax} / T_a = K_v \cdot M_m / T_a = 2,6 \cdot M_m / 4 = 0,65 \cdot M_m.$$

Удельная хладопроизводительность подзарядной холодильной установки  $Q_x$ :

- для типовой системы охлаждения ( $T_o = T_a = 2$  ч)

$$Q_x = M_m (t^{\circ}m1 - t^{\circ}m2) / T_o = 6,9 \text{ тыс. ккал/ч};$$

- с аккумулярованием холода в АХ между дойками ( $T_a = 10$  ч;  $T^*a = 4$  ч)

$$Q_x = M_m (t^{\circ}m1 - t^{\circ}m2) / T_a = 1,1 \text{ тыс. ккал/ч} - \text{ для двухразовой дойки};$$

$$Q_x = M_m (t^{\circ}m1 - t^{\circ}m2) / T^*a = 2,9 \text{ тыс. ккал/ч} - \text{ для трехразовой дойки};$$

**в линиях с емкостными теплообменниками:**

- режим смешивания хладоносителя в АХ

$$K_v \geq 3, \text{ при } t^{\circ}m1 = 17^{\circ}C, t^{\circ}m2 \leq 6^{\circ}C;$$

$$T_o = 2 \text{ ч, при } t^{\circ}v1 = 2,4^{\circ}C; M_m = 1,25 \text{ т};$$

$$q_{ax} = 2 \text{ м}^3/\text{ч, при } T_o = 2 \text{ ч, } t^{\circ}m2 \leq 6^{\circ}C, T_a \geq 4 \text{ ч};$$

- режим вытеснения хладоносителя в АХ

$$K_v = q_x \cdot T_o / M_m \leq 2,92, \text{ при } t^{\circ}m1 = 17^{\circ}C, t^{\circ}m2 \leq 6^{\circ}C;$$

$$T_o = 2 \text{ ч, при } t^{\circ}v1 = 2^{\circ}C; M_m = 1,25 \text{ т};$$

$$t^{\circ}v2 = (t^{\circ}m1 + 2 \cdot t^{\circ}o - 2) / 3 - \text{ для первого цикла охлаждения};$$

$$t^{\circ}v2 = 1/3 \cdot [(t^{\circ}m1 - 2) \cdot (1 + 2/3 + 2^2/3^2 + \dots + 2^{n-2}/3^{n-2}) + (t^{\circ}m1 + t^{\circ}o - 2) \cdot 2^{n-2}/3^{n-2}];$$

$n = (2, 3, 4, 5, \dots)$  - циклы функционирования;

$$q_{ax} = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч, при } T_o = 2 \text{ ч, } t^{\circ}m2 \leq 6^{\circ}C, T_a \geq 4 \text{ ч}.$$

Хладопроизводительность подзарядной холодильной установки  $Q_x$ :

- для типовой системы охлаждения ( $T_o = T_a = 2$  ч,  $M_m = 1,25$  т)

$$Q_x = M_m (t^{\circ}m1 - t^{\circ}m2) / T_o = 6,9 \text{ тыс. ккал/ч};$$

- с аккумулярованием холода в АХ между дойками

$$(T_a = 10 \text{ ч}; T^*a = 4 \text{ ч}, M_m = 1,25 \text{ т})$$

$$Q_x = M_m (t^{\circ}m1 - t^{\circ}m2) / T_a = 1,38 \text{ тыс. ккал/ч} - \text{ для двухразовой дойки};$$

$$Q_x = M_m (t^{\circ}m1 - t^{\circ}m2) / T^*a = 3,45 \text{ тыс. ккал/ч} - \text{ для трехразовой дойки}.$$

В табл.1 приведены сравнительные характеристики параметров аккумулятора холода (АХ) в зависимости от способа охлаждения молока и режимов аккумулярования естественного и искусственного холода. Установлено, что наиболее эффективным является режим вытеснения хладоносителя в АХ, позволяющий аккумуляровать холод до более низкой температуры ( $t^{\circ}v1 = 2^{\circ}C$ ) при минимальной кратности объемов хладоносителя к молоку ( $K_v = 2,6$ ). По сравнению с режимом смешивания, режим вытеснения хладоносителя в АХ позволяет не менее, чем в 3.3 раза уменьшить хладопроизводительность подзарядной холодильной установки  $Q_x$  и соответственно производительность насоса хладоносителя  $q_{ax}$  в режиме аккумуляции холода.

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики параметров аккумулятора холода в зависимости от способа охлаждения молока и режимов аккумулярования естественного и искусственного холода

Параметры аккумулятора холода	Способ охлаждения			
	Проточный охладитель		Емкостной охладитель	
	Смешивание	Вытеснение	Смешивание	Вытеснение
$K_v$	3,0	2,6	3,1	2,95
$t^{\circ}v1, ^{\circ}C$	2,4	2,0	2,4	2,0
$q_{ax}, \text{ м}^3/\text{ч}$	$2,1 \cdot M_m$	$0,65 \cdot M_m$	2,0	0,6

В результате реализации математических моделей процесса охлаждения молока установками сезонного и комбинированного действия в теплообменниках проточного и емкостного типов обоснованы технические и конструктивные параметры и режимы работы системы охлаждения Т2, определены эффективные вместимости аккумуляторов  $V_{ax}$  и секций  $n$ , их аккумулярующая способность  $W_a$  и время между дойками  $T_n$ , обеспечивающие охлаждение разового надоя молока  $M_m$  и зарядку холодом от атмосферного воздуха  $T_a$  4. Получено выражение, позволяющее определять температуру охлаждения молока  $t^{\circ}m2$  при последовательном подключении отдельных секций  $n$  в контур охлаждения в функции температуры атмосферного наружного воздуха  $t^{\circ}o$

$$t_{m2} = t_{m1} \cdot n^n / (n+v)^{n+K_b} / (n+K_b) \cdot [n^{n-1} / (n+K_b)^{n-1} + n^{n-2} / (n+K_b)^{n-2} \dots] \cdot t_o \quad (10)$$

В табл.2 и 3 представлены результаты расчета температуры охлаждения молока  $t_{m2}$  при различных конструктивных значениях  $n$ ,  $K_b$  и температуры наружного воздуха  $t_o$ .

Как видно из табл. 2, при  $t_o = 2^\circ\text{C}$  только при  $n = 3$  можно охладить молоко до  $6^\circ\text{C}$  и дальнейшее увеличение числа секций  $n$  мало влияет на показатели работы системы охлаждения. Эффективность охлаждения существенно возрастает с использованием системы предварительного охлаждения молока. Даже при  $t_o = 4^\circ\text{C}$  и  $n = 2$  температура охлажденного молока  $t_{m2}$  будет ниже  $6^\circ\text{C}$  (табл. 3).

Длительные производственные испытания аккумуляторов холода в технологических системах в с. Марамоновка и с. Цауль Дондюшанского района, в с. Кэинарий-Веке Сорокского района, а также в с. Выхватинцы Рыбницкого района Республики Молдова, показали, что они обеспечивают охлаждение молока до  $6^\circ\text{C}$  при  $t_o = 5 \dots -20^\circ\text{C}$ . При этом удельные затраты электроэнергии на охлаждение молока в зимнее время составили 2,0...4,0 кВт. ч / т.

В технологических системах охлаждения с использованием аккумуляторов-льдохранилищ (ЛХ) обоснованы контролируемые и регулируемые параметры и режимы ускоренного послыонного намораживания льда в холодное время года и его использования в летний и весенний периоды, определены эффективные значения требуемых емкостей ЛХ  $V_{л}$  для молочных ферм с различными годовыми удоями.

**Таблица 2.** Распределение температуры охлаждаемого молока  $t_{m2}$  при последовательном поочередном подключении секциях  $n$  АХ. Температура молока, поступающего на охлаждение  $t_{m1} = 30^\circ\text{C}$

Температура окружающей среды	$t_{m1} = 30^\circ\text{C}, K_b = 3$				
	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$	$n = 6$
$t_o = 0^\circ\text{C}$	4,7	3,7	3,1	2,8	2,6
$t_o = 2^\circ\text{C}$	6,1	5,1	4,7	4,2	3,9
$t_o = 4^\circ\text{C}$	7,5	6,6	6,1	5,6	5,3

**Таблица 3.** Распределение температуры охлаждаемого молока  $t_{m2}$  при последовательном поочередном подключении секциях  $n$  АХ. Температура поступающего на охлаждение молока  $t_{m1} = 17^\circ\text{C}$

Температура окружающей среды	$t_{m1} = 17^\circ\text{C}, K_b = 3$			
	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
$t_o = 0^\circ\text{C}$	2,6	2,0	1,8	1,6
$t_o = 2^\circ\text{C}$	4,3	3,8	3,6	3,4
$t_o = 4^\circ\text{C}$	5,9	5,5	5,3	5,1
$t_o = 6^\circ\text{C}$	7,6	7,3	7,1	6,9

**Таблица 4.** Зависимость времени паузы  $T$  от температуры наружного воздуха  $t_o$

Температура наружного воздуха $t_o, ^\circ\text{C}$	Расчетное время паузы $T$ , ч при подаче воды из нижней части ЛХ ( $t_{в1} = 1^\circ\text{C}$ )	Расчетное время паузы $T$ , ч при $t_{в1} = 1^\circ\text{C}$ и работе двух осевых вентиляторов $P = 1\text{ кВт}$
-5	3,4	1,4
-10	1,8	0,8
-15	1,1	0,5
-20	0,8	0,3

Обоснование эффективного режима зарядки АХ от подзарядной ХУ при минимальном расходе электроэнергии и материалоемкости УКД проведены на основе разработанной математической модели процесса аккумуляирования искусственного холода. В результате определен комплекс контролируемых и регулируемых параметров и технических средств, обеспечивающий автоматизацию процесса аккумуляирования холода между дойками и управление временем аккумуляирования  $\tau$  (работы подзарядной ХУ) и регулирование установкой времени  $t_y^o$ , в зависимости от количества охлаждаемого молока  $M_m$ . Основными параметрами контроля и регулирования являются время аккумуляирования  $\tau^*$  и температура хладоносителя  $t_x^o$  в АХ в зависимости от количества охлаждаемого молока  $M_m$ .

### ВЫВОДЫ

Для обеспечения функционирования линии в оптимальном энергетическом режиме с новыми техническими средствами и обоснования основных параметров энергосберегающих систем охлаждения молока, разработаны математические модели процессов аккумуляирования холода и охлаждения молока водо-ледяными аккумуляторами сезонного и круглогодичного действия в теплообменниках проточного и емкостного типов.

Теоретически и экспериментально исследованы два основных режима функционирования и подзарядки установок: режим смешивания, при котором происходит перемешивание хладоносителя с отепленной водой, и температура хладоносителя во всем объеме быстро выравнивается; режим вытеснения, при котором, хладоноситель, подаваемый снизу, не перемешиваясь с теплой, вытесняет ее.

Длительные производственные испытания аккумуляторов холода в технологических системах в с. Марамоновка и с. Цауль Дондюшанского района, в с. Кэинарий-Веке Сорокского района, а также в с. Выхватинцы Рыбницкого района Республики Молдова, показали, что они обеспечивают охлаждение молока до  $6^{\circ}\text{C}$  при  $t_o^o = 5...-20^{\circ}\text{C}$ . При этом удельные затраты электроэнергии на охлаждение молока в зимнее время составили 2,0...4,0 кВт. ч / т.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ВОЛКОНОВИЧ, I. Л., СЫРГИ, К. (2002). Энергосберегающие, экологические системы естественного холода для хранения пищевых продуктов. Кишинев. 334 с. ISBN 9975-62-078-7.
2. КУШНИР, М. (2015). Выбор и обоснование оптимальных параметров и режимов работы, автоматизированных энергосберегающих технологических систем охлаждения молока. In: Lucrări științifice, UASM, vol. 45: Inginerie agrară și transport auto, p. 437. ISBN 978-9975-64-276-7.
3. МУСИН, А., МАРЬЯХИН, Ф., УЧЕВАТКИН, А. (2006). Структура системы электрооборудования технологических линий обработки молока. В: НТБ ВИ-ЭСХ, вып. 2(54), с. 3-11.
4. УЧЕВАТКИН, А. (2008). Минимизация и оптимизация алгоритмов управления холодильных установок технологических линий для обработки молока. В: Проблемы электрификации, автоматизации и теплоснабжения с.-х. производства: тез. докл. Всесоюз. научн. конф., 25-27 ноября 2008, с. 109-110.

Data prezentării articolului: 29. 09.2017

Data acceptării articolului: 27.10.2017