

УДК 637.116:681.332

В. Н. ДАШКОВ, Н. Ф. КАПУСТИН, А. М. ЛИТОВСКИЙ, Д. А. ЗУЙКЕВИЧ

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ МОЛОКА ПРИ АГРЕГАТИРОВАНИИ С СЕЗОННОДЕЙСТВУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА

Институт механизации сельского хозяйства НАН Беларуси

(Поступила в редакцию 02.11.2004)

Введение. Охлаждение — один из основных этапов первичной обработки молока, является наиболее энергоемким процессом на молочно-товарной ферме (МТФ), на его долю приходится 20—24% всех затрат электроэнергии (рис. 1).

В хозяйствах республики в настоящее время эксплуатируется около 10000 установок для охлаждения и временного хранения молока, что составляет в среднем 5 установок на 1 хозяйство, или 1,6 установки на 1 ферму [1]. За последние годы на МТФ начали поступать молокоохладители импортного производства, как правило, закрытого типа с непосредственным охлаждением. По разным данным в хозяйствах эксплуатируется уже более 1500 таких машин. Остальные — это установки с промежуточным хладоносителем: ТОМ-2А, SM-1200, СЛ-1250, СЛ-1600, резервуары-охладители РПО-1.6, РПО-2.5.

Достоинством охладителей с промежуточным хладоносителем, в сравнении с установками непосредственного охлаждения, являются: простота конструкции, низкая стоимость, надежность, легкость обслуживания и ремонта. Кроме того, при охлаждении молока ледяной водой исключена опасность подмерзания, как это может происходить в определенных условиях в установках непосредственного охлаждения. К недостаткам систем с промежуточным хладоносителем можно отнести более высокое значение удельного расхода электроэнергии по сравнению с системами непосредственного охлаждения (20—25кВт·ч/т против 16—18 кВт·ч/т) и более высокие значения массогабаритных показателей [1].

Один из путей сокращения расхода энергии на первичное охлаждение молока — использование возобновляемых источников энергии, в частности, применение естественного холода атмосферного воздуха. При его использовании применяются два способа реализации процесса теплообмена: с промежуточным хладоносителем или без него.

Достоинством использования атмосферного воздуха при охлаждении молока в случае, когда для реализации процесса теплообмена не используется промежуточный хладоноситель (атмосферный воздух подается непосредственно в пространство между молочной емкостью и стенками молокоохладителя), является простота и надежность, а недостатком — высокая чувствительность к колебаниям температуры атмосферного воздуха и невозможность совместной работы с компрессорно-конденсаторным агрегатом холодильной установки.

Установки, использующие промежуточный хладоноситель, можно разделить на три группы: объемные, пленочные, капельно-дисперсионные. В качестве объемных установок используются водяные аккумуляторы, достоинство которых — высокая хладопроизводительность и большая инерционность, а недостаток — опасность полного за-

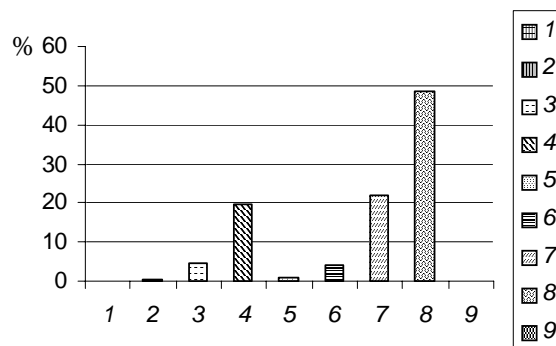


Рис. 1. Процентное соотношение прямого использования электроэнергии при производстве молока на МТФ 100—200 голов: 1 — раздача кормов, 2 — приготовления кормов, 3 — водоснабжение, 4 — освещение, 5 — навозоудаление, 6 — доение, 7 — охлаждение молока, 8 — нагрев воды, 9 — выдача молока

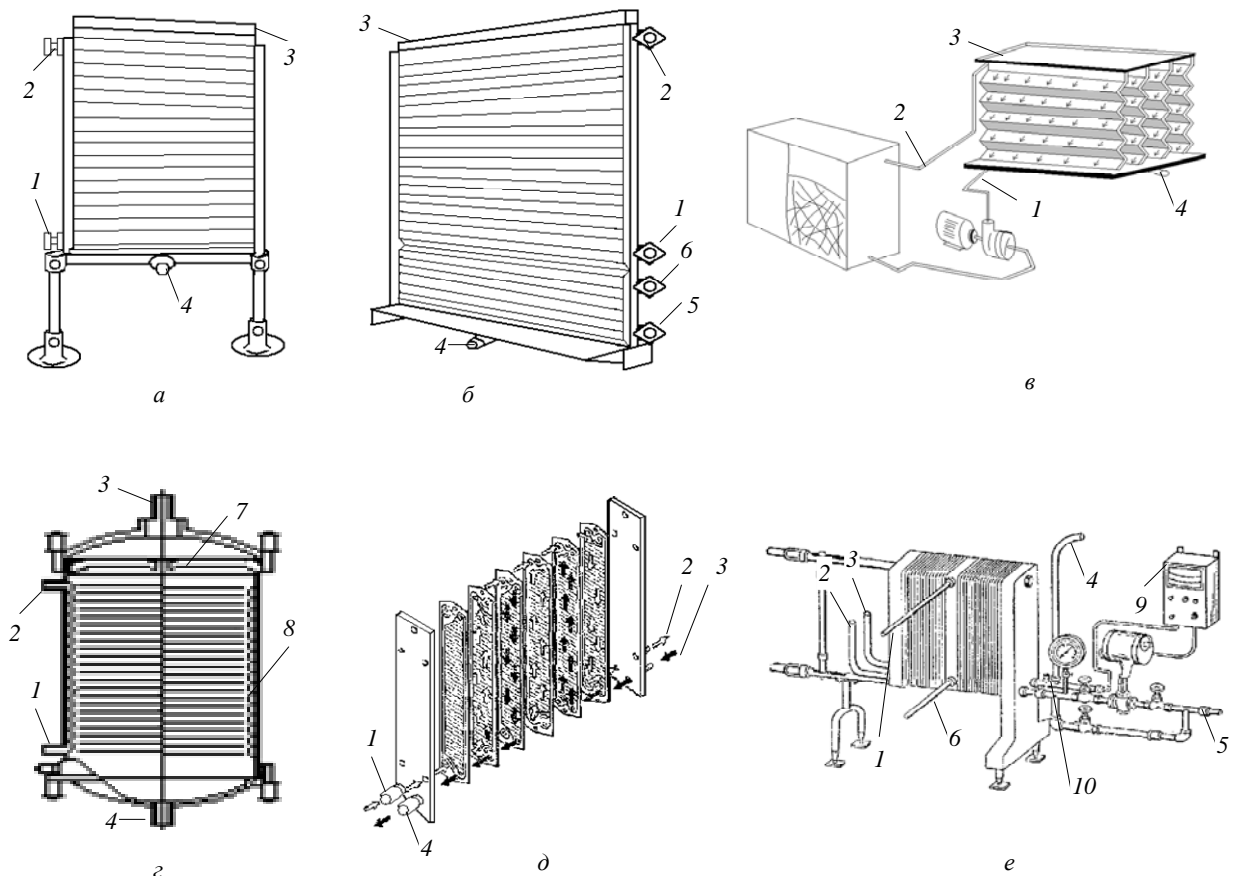


Рис. 2. Проточные охладители молока: *a* — трубчатый односекционный; *b* — трубчатый двухсекционный; *v* — пластинчатый открытого типа в комплекте ООМ—1000А; *z* — вакуумный цилиндрический; *d* — пластинчатый закрытого типа (ОМ—400); *e* — ООУ-М; 1 — вход воды, 2 — выход воды, 3 — вход молока, 4 — выход молока, 5 — вход рассола ледяной воды; 6 — выход ледяной воды 7 — распределитель молока, 8 — змеевиковый канал, 9 — шкаф управления, 10 — термометр сопротивления

мерзания системы и большая металлоемкость конструкции. По схеме с пленочным движением хладоносителя в теплообменном устройстве работает охладитель молока ОМС-12, по схеме с капельно-дисперсионным движением — ОМС-0.5. Достоинства данных охладителей: высокая интенсивность теплообменных процессов и устойчивость к воздействию низких температур. Применение ОМС-12 или ОМС-0.5 позволяет снизить удельный расход электроэнергии на охлаждение 1 т молока в период эксплуатации до 5 кВт·ч и 8 кВт·ч соответственно и увеличить срок службы компрессорно-конденсаторного агрегата на 30—40% [2]. Существенным недостатком рассмотренных выше систем охлаждения является невозможность их совместной работы в межсезонные периоды года (весенне-летний и летне-осенний), когда используется либо сезоннодействующая установка, либо источник искусственного холода. Кроме этого, и ОМС-12, и ОМС-0.5 не возможно агрегатировать с молокоохладителями непосредственного охлаждения.

Рассмотрим возможность использования естественного холода, обеспечивающего снижение расхода электроэнергии, при применении с молокоохладительными установками непосредственного охлаждения в комплекте с проточным охладителем молока.

Применение проточного охладителя имеет ряд преимуществ по сравнению с наиболее распространенным в настоящее время объемным способом: сокращается продолжительность цикла охлаждения, что повышает качество продукции; снижаются затраты энергии на первичное охлаждение молока.

Известен ряд вариантов проточных охладителей (рис. 2), конструктивно подразделяющихся на два вида: пластинчатые и трубчатые.

Пластинчатый охладитель состоит из набора металлических пластин, изготовленных холодной штамповкой. Перенос тепла осуществляется через эти пластины. Каждая пластина оснащена соединительными элементами: прокладками из EPDM (этилен-пропилен), NBR (Nitrile), FPM (фтористая резина, Viton), CSM (Hypalon) и т. д., которые обеспечивают одновременно

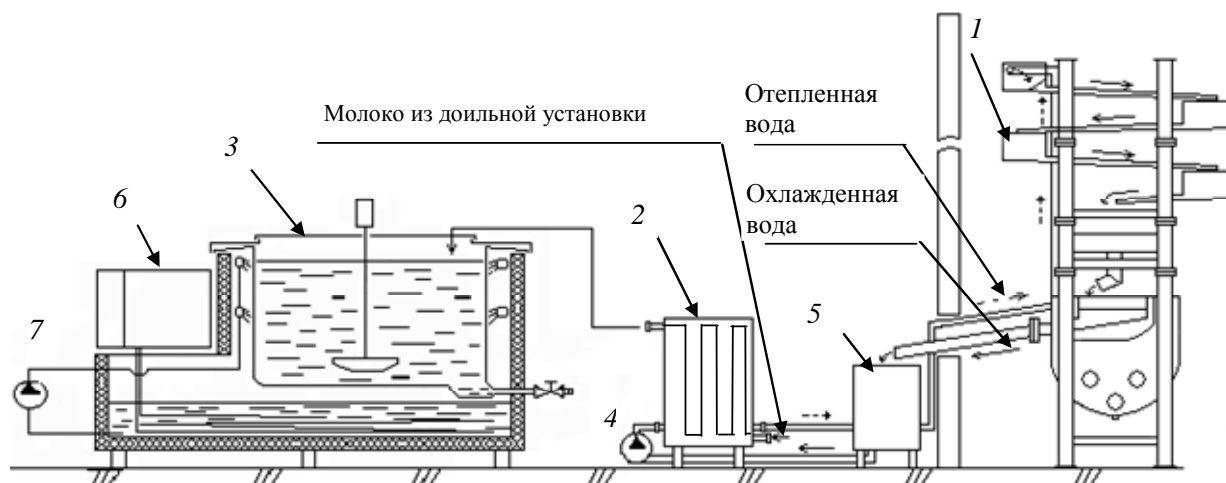


Рис. 3. Общая схема системы

и герметичность всего набора, и распределение сред в каналах, образованных пластинами. Пластины, изготовленные из нержавеющей стали марки AISI 316 или из титана, собраны в пакет между двумя съемными зажимными плитами. После сборки (стягивания специальными стяжными винтами) выступы пластин и фигурные прокладки образуют зигзагообразные протоки, объединяемые сборными каналами, выходящими в виде подсоединительных патрубков наружу охладителя. Проточные охладители могут иметь несколько секций: первая охлаждается проточной водопроводной водой, вторая — ледяной водой из водоохлаждающей установки. Коэффициент теплопередачи пластинчатого теплообменника составляет порядка $6000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Этот тип устройства имеет следующие преимущества: компактность, низкую массу, возможность добавлять или удалять пластины, оптимальный теплообмен при противотоке, простоту разборки. Наиболее существенным недостатком пластинчатых проточных охладителей является необходимость частой разборки устройства для обеспечения чистоты поверхности пластин.

Трубчатые охладители молока в настоящее время применяются редко. Связано это в первую очередь с трудностью их периодической очистки. В лаборатории использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) РУНИП «ИМСХ НАН Беларуси» ведутся работы по созданию новой конструкции трубчатого проточного охладителя молока, лишенного указанного недостатка. Поверхность теплообмена выполнена из двойных труб с кольцевым каналом. Молоко поступает во внутренние трубы, а охлаждающая вода — в кольцевые каналы. Схема течения молока и хладоносителя параллельно-смешанная. Существенным отличием предлагаемой конструкции от ранее известных являются устройства трубных досок и крышек. Наличие легко съемных крышек позволяет оперативно контролировать состояние внутренних поверхностей молочных трубок и при необходимости осуществлять их механическую очистку.

Работа системы охлаждения, включающей проточный охладитель молока, ОМС-12 и охладитель молока в комбинированном режиме осуществляется по следующей схеме (рис. 3): молоко подается насосом через проточный охладитель 2 в объемный охладитель 3 или резервуар накопитель, одновременно в противотоке циркуляционным насосом 4 прокачивается охлажденная вода, циркулирующая по контуру ОМС 1 — расширительный бак 5 — проточный охладитель 2 — ОМС. Орошение наружной поверхности молочной ванны водой в емкостном охладителе обеспечивается насосом 7; 6 — компрессорно-конденсаторный агрегат объемного охладителя.

Определение оптимальных конструктивных параметров проточного охладителя молока при агрегатировании с сезоннодействующим устройством ведется на основании тепломассообменных процессов и построения математической модели процесса.

Исходные данные для расчета проточного охладителя молока: расход молока — $0,139 \text{ кг}/\text{с}$, температура молока, входящего в проточный охладитель, — $35 \text{ }^\circ\text{C}$; расход охлаждающей воды — $0,56 \text{ кг}/\text{с}$; температура охлажденной воды, входящей в проточный охладитель, — $1 \text{ }^\circ\text{C}$; коэффициент запаса — $1,1$; коэффициент загрязнения — $3,52 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$; теплопроводность стали — $14 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$; температура молока, выходящего из проточного охладителя, — не более $4 \text{ }^\circ\text{C}$. Физические свойства молока приняты из работы [3], а хладоносителя (воды) — из работы [4]. Поверхность теплообмена аппарата выполнена из нержавеющей стали.

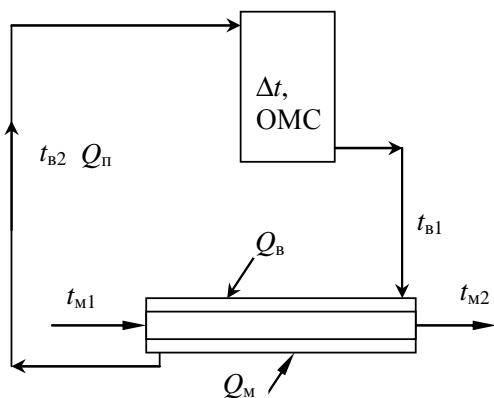


Рис. 4. Схема тепловых потоков системы

Построение математической модели процесса. Схема тепловых потоков системы охлаждения представлена на рис. 4.

Уравнение теплового баланса системы:

$$\begin{cases} Q_{\text{М,В}} = G_{\text{М}}c_{\text{М}}(t_{\text{М1}} - t_{\text{М2}}) = G_{\text{В}}c_{\text{В}}(t_{\text{В2}} - t_{\text{В1}}), \\ Q_{\text{ТП}} = kF\Delta t_{\text{ср}}, \\ Q_{\text{П}} = Q_{\text{от}} + Q_{\text{исп}}, \end{cases}$$

где $Q_{\text{М,В}}$ — количество подведенного (или отведенного) тепла (тепловая нагрузка теплообменного аппарата), кВт; $G_{\text{М}}$ — расход молока, кг/с; $c_{\text{М}}$ — теплоемкость молока, Дж/(кг·°C); $t_{\text{М1}}, t_{\text{М2}}$ — температура молока на входе и выходе соответственно, °C; $G_{\text{В}}$ — расход воды, кг/с; $c_{\text{В}}$ — теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); $t_{\text{В1}}, t_{\text{В2}}$ —

температура воды на входе и выходе соответственно, °C; $Q_{\text{ТП}}$ — тепловой поток по уравнению теплопередачи, кВт; k — коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C); F — площадь поверхности теплообмена, м²; $\Delta t_{\text{ср}}$ — средний температурный напор, °C; $Q_{\text{П}}$ — количество тепла, подведенного к ОМС, кВт; $Q_{\text{от}}, Q_{\text{исп}}$ — количество тепла, отведенного ОМС путем теплопередачи через днище скатной панели, и испарения соответственно, кВт.

Расчет охладителя молока проводился методом итераций. Методика теплового расчета проточного охладителя молока.

Параметры молока. Тепловой поток по балансу, кВт:

$$Q_{\text{М}} = G_{\text{М}}c_{\text{М}}(t_{\text{М1}} - t_{\text{М2}}). \quad (1)$$

Температура молока, выходящего из проточного охладителя, определяется подбором таким образом, чтобы невязка баланса не превышала 0,1%.

Средняя скорость молока, м/с:

$$V_{\text{М}} = \frac{G_{\text{М}}}{f_{\text{М}}\rho_{\text{М}}}, \quad (2)$$

где $f_{\text{М}}$ — живое сечение для прохода молока, м²; $\rho_{\text{М}}$ — плотность молока, кг/м³.

Коэффициент теплоотдачи для молока, Вт/(м²·°C) [5]:

$$\alpha_{\text{М}} = \frac{(\xi_{\text{М}}/8)\text{Re}_{\text{М}}\text{Pr}_{\text{М}}(\lambda_{\text{М}}/d_{\text{В}})}{1 + 900/\text{Re}_{\text{М}} + 4,5\sqrt{\xi_{\text{М}}}(\text{Pr}_{\text{М}}^{2/3} - 1)}, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{М}}$ — теплопроводность молока, Вт/(м·°C); $d_{\text{В}}$ — внутренний диаметр трубы для молока, мм; $\text{Re}_{\text{М}}$ — число Рейнольдса для молока; $\text{Pr}_{\text{М}}$ — число Прандтля для молока; $\xi_{\text{М}}$ — коэффициент сопротивления трения для молока [5].

Число Прандтля:

$$\text{Pr}_{\text{М}} = \frac{v_{\text{М}}\rho_{\text{М}}c_{\text{М}}}{\lambda_{\text{М}}}, \quad (4)$$

где $v_{\text{М}}$ — вязкость молока, м²/с.

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{М}} = \frac{d_{\text{В}}V_{\text{М}}}{v_{\text{М}}}. \quad (5)$$

Параметры воды. Тепловой поток по балансу, кВт:

$$Q_{\text{В}} = G_{\text{В}}c_{\text{В}}(t_{\text{В2}} - t_{\text{В1}}), \quad (6)$$

Температура воды, выходящей из проточного охладителя, °C:

$$t_{\text{В2}} = \frac{G_{\text{М}}c_{\text{М}}(t_{\text{М1}} - t_{\text{М2}}) + G_{\text{В}}c_{\text{В}}t_{\text{В1}}}{G_{\text{В}}c_{\text{В}}}, \quad (7)$$

Коэффициент теплоотдачи для воды при течении в трубе с диаметром D_3 , Вт/(м²·°C) [6]:

$$\alpha_T = 0,116 \left(\text{Re}_B^{2/3} - 125 \right) \text{Pr}_B^{1/3} \left[1 + \left(\frac{D_3}{L} \right)^{2/3} \right] \frac{\lambda_B}{D_3}, \quad (8)$$

где D_3 — эквивалентный диаметр для воды, мм; L — длина двойных труб, мм; λ_B — теплопроводность воды, Вт/(м·°C); Re_B — число Рейнольдса для воды; Pr_B — число Прандтля для воды.

Коэффициент теплоотдачи при течении воды в кольцевом канале, Вт/(м²·°C) [7]:

$$\alpha_B = \zeta \cdot \alpha_T, \quad (7)$$

где ζ — поправочный коэффициент при течении в кольцевом канале [5].

Число Рейнольдса и число Прандтля для определения параметров воды определяется по (4,5).

Коэффициент теплоотдачи со стороны воды, отнесенный к поверхности омываемой молоко, Вт/(м²·°C):

$$\alpha'_B = \left(\frac{d_B}{d} \frac{1}{\alpha_B} + \frac{d_B}{2\lambda_c} \ln \frac{d}{d_B} + r_f \right)^{-1}, \quad (9)$$

где λ_c — теплопроводность стали, Вт/(м·K); d — диаметр трубы для молока, мм; r_f — коэффициент загрязнения, м²·K/Вт.

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C):

$$k = \frac{\alpha_M \alpha'_B}{\alpha_M + \alpha'_B} \frac{1}{\psi}, \quad (10)$$

где ψ — коэффициент запаса.

Температурный напор на входе молока, °C:

$$\Delta t_B = t_{M1} - t_{B2}. \quad (11)$$

Температурный напор на выходе молока, °C:

$$\Delta t_M = t_{M2} - t_{B1}. \quad (12)$$

Средний температурный напор, °C:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln(\Delta t_B / \Delta t_M)} \psi_t, \quad (13)$$

где ψ_t — поправка на схему течения [6].

Тепловой поток по уравнению теплопередачи, кВт:

$$Q = k \Delta \bar{t} F. \quad (14)$$

Невязка баланса:

$$\Delta Q = \frac{|Q_B - Q|}{Q} 100. \quad (15)$$

Количество тепла, подведенного к ОМС, и количество тепла, отведенного от ОМС путем теплопередачи через днище скатной панели и испарения соответственно, а также температура хладоносителя (воды), выходящего со скатной панели ОМС, определяются на основании математической модели теплового баланса [8].

Результаты расчета. Были исследованы: влияние изменения конструктивных параметров, расхода молока, воды и температуры атмосферного воздуха на температуру молока, выходящего из проточного охладителя; зависимость изменения температуры воды, выходящей из ОМС, от ее расхода (табл. 1).

Изменение температуры хладоносителя (воды), выходящего со скатной панели ОМС, в зависимости от его расхода при температуре на входе в ОМС равной температуре выходящего из проточного охладителя молока, представлена в табл. 2.

Т а б л и ц а 1. Зависимость изменения температуры молока, выходящего из проточного охладителя, при изменении диаметра и длины трубы для молока

$t_{M2}, ^\circ\text{C}$	Длина двойных труб, м			
	20	30	40	44
$d_B = 15 \text{ мм}$	11,82	7,42	4,86	4,15
$d_B = 20 \text{ мм}$	12,55	8,05	5,36	4,61

Т а б л и ц а 2. Изменение температуры в зависимости от расхода воды на выходе из ОМС

$t, ^\circ\text{C}$	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$					
	1,5	2	3	4	5	6
На входе	8,6	6,9	5	3,9	3,3	2,9
На выходе	4,5	3,8	2,86	1,8	1,4	1,1

Исходя из приведенных выше характеристик (рис. 5—8; табл. 1, 2) следует, что при расходе хладоносителя $6 \text{ м}^3/\text{ч}$ и длине молочной трубы 36 м обеспечивается необходимый тепловой баланс, при котором температура молока на выходе из проточного охладителя равна 4°C , температура воды на входе в проточный охладитель равна 1°C , при этом температура воды на выходе из него, соответственно, равна температуре на входе в ОМС и имеет значение $2,9^\circ\text{C}$, а на выходе из ОМС — $1,1^\circ\text{C}$.

Оптимальные конструктивные характеристики проточного охладителя молока при агрегатировании с сезоннодействующим устройством при которых будет обеспечиваться необходи-

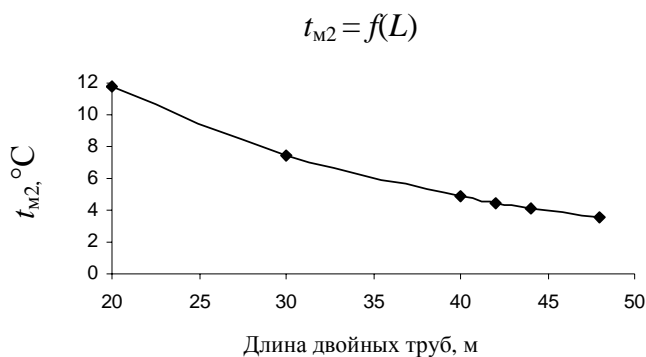


Рис. 5. Изменение температуры молока, выходящего из проточного охладителя, при изменении длины двойных труб

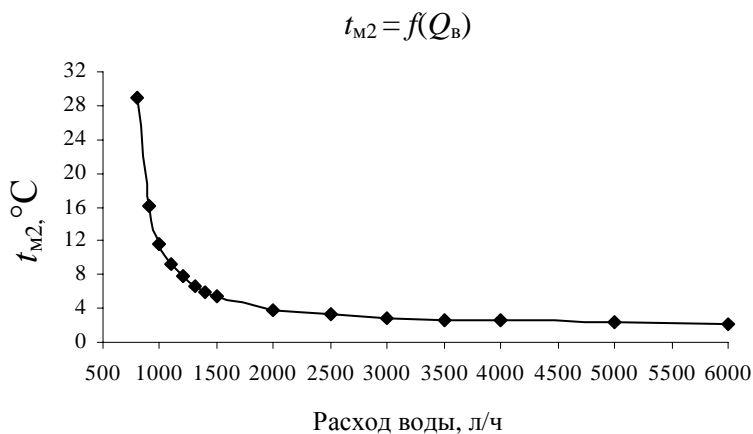


Рис. 6. Изменение температуры молока, выходящего из проточного охладителя, в зависимости от расхода воды (длина двойных труб 42 м)

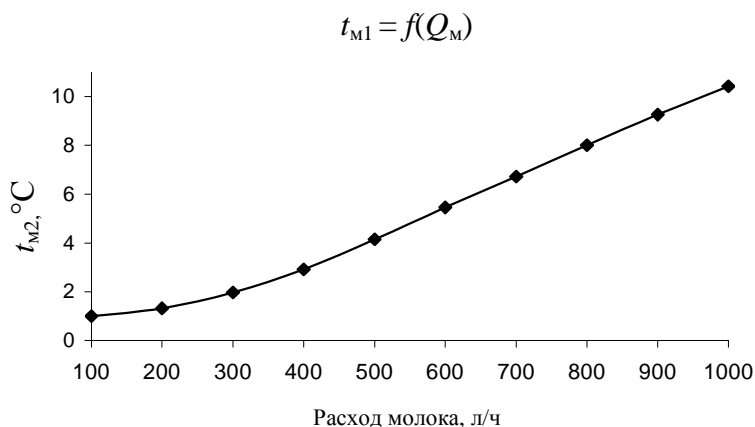


Рис. 7. Изменение температуры молока в зависимости от его расхода в проточном охладителе

мая интенсивность охлаждения: диаметр и толщина стенки внутренней трубы — 17×1 мм, внутренний диаметр трубы для молока — 15 мм, внутренний диаметр трубы для молока — 15 мм, внутренний диаметр внешней трубы — 22 мм, кольцевой зазор между трубами — 2,5 мм, количество двойных труб — 30 шт., число ходов по молоку — 30, число ходов по воде — 7,5, длина двойных труб — 1380 мм, площадь поверхности теплообмена — $1,94 \text{ м}^2$, живое сечение для прохода молока — $1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$, живое сечение для прохода воды — $6,13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

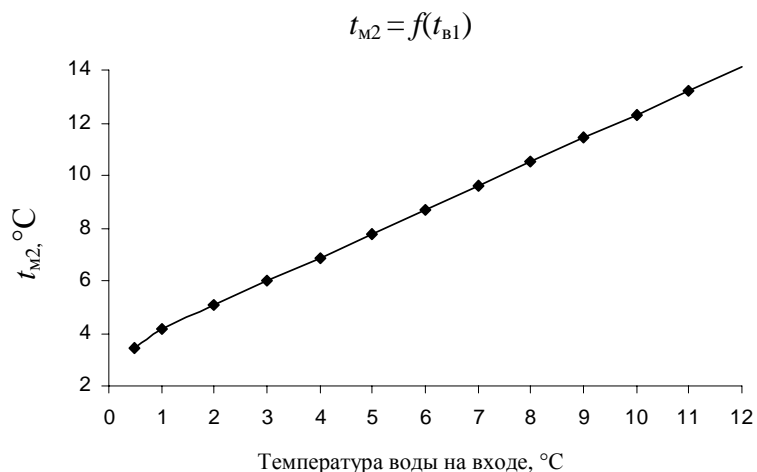


Рис. 8. Изменение температуры молока, выходящего из проточного охладителя, в зависимости от температуры воды

Выводы

1. Анализ математической модели процесса охлаждения молока позволил определить оптимальные конструктивные параметры проточного охладителя молока, которые составляют: внутренний диаметр трубы для молока — 15 мм, количество двойных труб — 30 шт., число ходов по воде — 7,5, длина двойных труб — 1380 мм.

2. Технология охлаждения молока с применением проточного охладителя обеспечивает более высокий по сравнению с объемным способом темп охлаждения молока (время охлаждения с $+35 \text{ °C}$ до $+4 \text{ °C}$ снижается с 3 до 2,2 ч), что обеспечивает максимальную сохранность его качеств и питательных свойств.

3. Агрегатирование проточного охладителя молока с сезоннодействующим охладителем, использующим естественный холод, позволяет снизить на 10–15% расход электроэнергии на охлаждение молока.

4. Использование проточного охладителя позволяет расширить область применения сезоннодействующих устройств путем агрегатирования их с объемными охладителями молока непосредственного охлаждения. Кроме этого появляется возможность более действенного использования сезоннодействующих устройств при их работе в комбинированном режиме с проточным охладителем молока за счет реализации в нем более эффективного процесса теплообмена.

Литература

1. Масюк А. М., Издебский В. В. // Междунар. аграр. журн. 1989. № 12. С. 50–51.
2. Daszkow W., Litowski A., Petrov K. // Podstawowe problemy w technologii chowu bydla i trzody chlewniej z uwzględnieniem aspektow ekologicznych: Miedzynarodowa konferencja naukowa. Warszawa, 1997. S. 199–205.
3. Тёпел А. Химия и физика молока: Пер. с нем. Л. Ф. Теречек М., 1979.
4. Андреев П. А., Гремилов Д. И., Федорович Е. Д. Теплообменные аппараты ядерных энергетических установок. Л., 1965.
5. Кириллов П. Л., Юрьев Ю. С., Бобков В. П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М., 1990.
6. Керн Д., Краус А. Развитие поверхности теплообмена. М., 1977.
7. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидравлическое сопротивление: Справ. пособие. М. 1992.
8. Севернев М. М., Литовский А. М., Буляк О. Н. // Математическое моделирование сельскохозяйственных объектов — основа проектирования технологий и машин XXI века: Материалы Междунар. науч. конф. Минск, 27–28 февраля 2001 г. Мн., 2001. С. 198–204.

DASHKOV V. N., KAPUSTIN N. F., LITOVSKY A. M., ZUIKEVICH D. A.

CALCULATION OF PARAMETERS OF FLOWING MILK-COOLER AT CONNECTING WITH SEASON DEVICE ON A BASIS OF MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS

Summary

Analysis of various ways, systems of milk-cooling used on dairy-commodity farms of Belarus and expanses of electric power for process has been executed. Special attention has given to renewed energy sources in particularly to a natural cold of atmospheric air as to one of basic way of reduction of expenses of electric power during primary milk-cooling. It has been described a way of reduction of power inputs due to use of flowing cooler in a scheme of milk cooling: capacitor of milk cooler — a flowing of milk cooler — the device for use of natural cold. Calculation and substantiation of optimum design data of a flowing milk-cooler of tubular type have been carried out.