

МЕХАНИЗАЦИЯ И ЭНЕРГЕТИКА

В.Н. Дашков, кандидат технических наук
А.М. Литовский, старший научный сотрудник
Д.А. Зуйкевич, аспирант

Институт механизации сельского хозяйства НАН Беларуси
 УДК 637.117

Оценка возможности повышения эффективности сезоннодействующих охладителей молока

Анализируется современное состояние техники для охлаждения молока, эксплуатируемой на молочнотоварных фермах Республики Беларусь. Особое внимание уделяется энергетическому аспекту процесса первичного охлаждения. Описан способ сокращения энергозатрат за счет использования сезоннодействующих установок ОМС-12 и ОМС-0,5. Дано теоретическое обоснование возможности продления периода эксплуатации установок типа ОМС при их комбинированном использовании с компрессорно-конденсаторными агрегатами охладителей молока.

The article analyses the modern status of the technique for milk cooling, operated on Belarusian dairy farms. Special attention is given to energy aspect of the initial cooling process. The author describes the method of reducing energy consumption by means of using seasonal units OMS-12 and OMS-0,5. The article theoretically justifies the opportunity of prolonging the period of operating the OMS type units if they are used together with the compressor – condensates coolers.

Введение

Среди пищевых продуктов молоко по составу необходимо для организма человека питательных веществ занимает первое место. Поэтому большое значение имеет сохранение первоначальных его свойств на всех этапах пути к потребителю.

Получение качественного молока как сырья для молочной промышленности в значительной степени зависит от первичной обработки на молочных фермах. Повышение эффективности первичной обработки ведёт к улучшению качества молока и, как следствие, – к повышению эффективности всей молочной промышленности. К первичной обработке относятся такие технологические операции, как очистка молока от возможных механических примесей, охлаждение, хранение и транспортировка. Охлаждение является одной из основных ступеней первичной обработки. Благодаря охлаждению в молоке приостанавливается размножение микроорганизмов, увеличивается бактерицидный период, что способствует увеличению периода его хранения.

Охлаждение молока весьма энергоёмкий процесс. При использовании парка холодильных машин в настоящее время на охлаждение 1 т молока расходуется до 40 кВт·ч электроэнергии, что существенно сказывается на его себестоимости и требует разработки и реализации новых ресурсов – и энергосберегающих технических решений.

Анализ состояния проблемы

В соответствии с ГОСТ 13264-88 "Молоко коровье" свежесвыдоенное молоко должно быть охлаждено до 6°C в течение 2 часов с момента окончания дойки.

В настоящее время для охлаждения молока на молочнотоварных фермах Республики Беларусь используется два типа холодильных установок:

- с применением искусственного холода в течение всего времени года;
- с использованием в зимний сезон естественного холода.

Каждая из этих установок может работать автономно либо совместно при наличии автоматизированной системы управления.

На молочных фермах республики эксплуатируется около 10000 молокоохладительных установок (МХУ) различных марок, средний срок эксплуатации которых превышает 15 лет. Работа таких машин сопровождается большим расходом электроэнергии, частыми отказами, ведущими к потерям качества молока, высокими затратами на эксплуатацию и текущий ремонт. В целях повышения эффективности их работы в лаборатории использования ТЭР БелНИИМСХ были разработаны и внедрены в производство сезонные молокоохладители, использующие естественный холод атмосферного воздуха (далее ОМС) двух моделей: ОМС-12 – работающие по схеме с плёночным движением хладоносителя, и ОМС-0,5 – с капельно-дисперсионным движением хладоносителя.

Применение ОМС-12 или ОМС-0,5 позволяет снизить удельный расход электроэнергии на охлаждение 1 т молока в период эксплуатации до 5 и 8 кВт·ч соответственно, увеличить срок службы компрессорно-конденсаторного агрегата на 30-40%/1/.

Наибольшая эффективность использования ОМС-12 достигается при агрегатировании с молокоохладительными установками и резервуарами-охладителями ёмкостью 2-2,5 тыс.л (ТОМ-2А, РПО-2,5), а ОМС-0,5 – при ёмкостях

молочной ванны до 1600 л (SM-1200, СЛ-1250, СЛ-1600, РПО-1,6).

Период работы этих сезоннодействующих охладителей составляет 160-180 дней в год в зависимости от региона и ограничивается предельной температурой атмосферного воздуха $+4^{\circ}\text{C}$. В остальное время года охлаждение молока обеспечивается работой штатного компрессорно-конденсаторного агрегата холодильной установки.

Обоснование схемы использования ОМС и анализ климатических условий

Для более эффективного использования ОМС необходимо рассмотреть возможность продления интервала его применения в межсезонные периоды (весенне-летний и летне-осенний) путем обеспечения совместной работы со штатным холодильным оборудованием в автоматизированном комбинированном режиме.

Работа в комбинированном режиме может осуществляться по следующей схеме:

- аккумуляция холода в баке-аккумуляторе ОМС в ночное время и использование накопленного холода для охлаждения молока при утренней дойке;
- охлаждение молока непосредственно сезоннодействующей установкой;
- доохлаждение молока при необходимости штатной холодильной установкой;
- дополнительное аккумулялирование холода путем предварительного намораживания льда штатной холодильной машиной.

Количественным параметром, характеризующим эффективность замещения традиционного энергоносителя (электроэнергии) возобновляемым источником энергии в виде естественного холода, будет являться доля времени работы ОМС при реализации полного цикла охлаждения молока.

Для определения возможного дополнительного времени работы установок в комбинированном режиме рассмотрим суточный ход температур наружного воздуха в период с апреля по октябрь включительно (рис. 1), когда

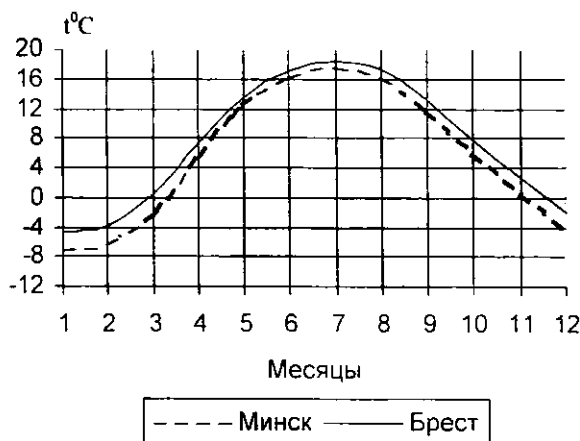


Рис. 1. Изменение среднемесячных температур атмосферного воздуха в течение года

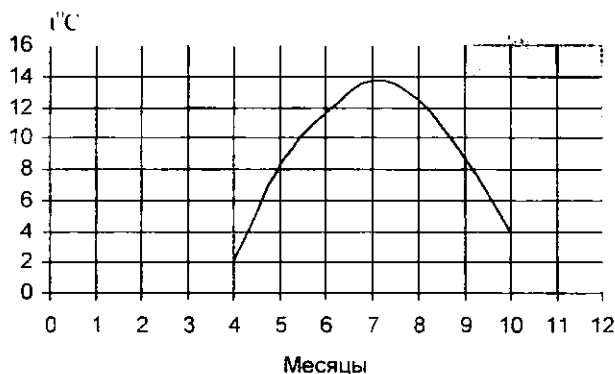


Рис. 2. Наиболее низкая в течение суток температура атмосферного воздуха в весенне-летний период

температура открытого воздуха превышает установленный критический уровень. Анализ изменения многолетних среднемесячных температур позволяет провести расчёт времени использования ОМС и штатной холодильной установки для охлаждения молока при их работе в комбинированном режиме.

Как видно из рисунка 2, наиболее низкая в течение суток температура воздуха в период с апреля по октябрь изменяется от 2 до 14°C . Для диапазона температур $0,1 - 15,0^{\circ}\text{C}$ число дней со среднесуточной температурой в пределе от $0,1$ до $5,0^{\circ}\text{C}$ составляет 14,2; от $5,1$ до $10,0$ — 42,2; от $10,1$ до $15,0$ — 60,7 (средние данные за 15 лет) /2/.

Расчёт времени работы молокоохладителей ведётся на основании анализа баланса тепло- и массообменных процессов.

Построение расчетной модели

Температура молока в молочной ванне в момент времени τ /3/:

$$t(\tau) = t_x + (t_{n,m} - t_x) \exp \left[- \frac{c_x G_x}{c_m m_m} \left(1 - e^{-\frac{\kappa F}{c_x G_x} \tau} \right) \right], \quad (1)$$

где t_x — начальная температура хладоносителя (вода), $^{\circ}\text{C}$;

$t_{n,m}$ — начальная температура молока, $^{\circ}\text{C}$;

c_x и c_m — удельная теплоёмкость хладоносителя и молока соответственно, $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$;

G_x — расход хладоносителя, кг/ч ;

m_m — масса молока, кг ;

τ — время от начала цикла охлаждения, ч ;

κ — коэффициент теплопередачи от молока к хладоносителю через стенку молочной ванны, $\kappa = 1800 \text{ кДж/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град} / 4$;

F — площадь теплообменной поверхности молочной ванны, м^2 .

Температура хладоносителя на выходе из рубашки охлаждения в момент времени τ :

$$t_{x,p}(\tau) = t(\tau) \left(1 - \exp \left(- \frac{\kappa F}{c_x G_x} \right) \right) + t_{x,n} \exp \left(- \frac{\kappa F}{c_x G_x} \right). \quad (2)$$

Для ОМС-12. Температура выходящего со скатной панели хладоносителя /3/:

$$t_{x, \text{вых}} = \frac{t_{x, \text{вх}}(c_x G_x - 0,5kF_n) + kF_n t_{\text{атм}} - Q_n}{c_x G_x + 0,5kF_n}, \quad (3)$$

где $t_{x, \text{вх}}$ – температура хладоносителя на входе скатной панели, $^{\circ}\text{C}$;

F_n – площадь скатных панелей, м^2 ;

Q_n – количество теплоты, отводимой от поверхности хладоносителя, стекающего по панелям при испарении, кДж .

Расчётные значения, входящие в состав приведенного выражения, определяются по следующим формулам.

Коэффициент теплопередачи от воды к воздуху через днище скатной панели:

$$\kappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (4)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от воды к металлу, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

δ – толщина стенки бака-аккумулятора, м ;

λ – коэффициент теплопроводности металла, $\text{кДж}/\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от металла к воздуху, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

Так как в данном случае $\alpha_2 \ll \alpha_1$, то примем допущение, что $\kappa \approx \alpha_2$.

Количество теплоты, отводимой от поверхности хладоносителя, стекающего по панелям при испарении:

$$Q_n = \sigma(i_w - i)F, \quad (5)$$

где σ – коэффициент испарения, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$;

i_w – энтальпия насыщенного воздуха у поверхности воды, $\text{кДж}/\text{кг}$;

i – энтальпия влаги от поверхности испарения, $\text{кДж}/\text{кг}$.

Коэффициент испарения:

$$\sigma = \alpha_2 / c_p, \quad (6)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи воздуха, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$;

c_p – удельная теплоёмкость влажного воздуха, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$.

Удельная теплоёмкость влажного воздуха:

$$c_p = 1 + 1,89d, \quad (7)$$

где d – влагосодержание воздуха, $\text{г}/\text{кг}$.

Влагосодержание воздуха:

$$d = 0,622 \frac{P_n}{P + P_n}, \quad (8)$$

где P – атмосферное давление, $P = 98 \cdot 10^3 \text{ Па}$; P_n – парциальное давление водяного пара в воздухе вдали от поверхности испарения:

$$P_n = \varphi \cdot P_n^s, \quad (9)$$

где P_n^s – парциальное давление водяных паров в насыщенном воздухе, Па ;

φ – относительная влажность воздуха.

Для ОМС-0,5. Температура хладоносителя на выходе

из охладителя выражается из уравнения для расчёта активного объема теплообменного устройства /5/:

$$t_{x, \text{вых}} = t_{x, \text{вх}} - \frac{Q}{V \alpha F \varphi}, \quad (10)$$

где Q – количество тепла, участвующего в процессе теплообмена, $\text{кДж}/\text{с}$;

α – коэффициент теплоотдачи капли жидкости воздуха, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C}$;

$t_{x, \text{вх}}$ – температура на входе в охладитель, $^{\circ}\text{C}$;

F – поверхность капель в пространстве теплообмена, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

φ – поправочный коэффициент, $\varphi = 0,95-0,85$.

Количество тепла, участвующего в процессе теплообмена:

$$Q_o = c_x \cdot G_x t_{x, \text{вх}}. \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи от капли воды к воздуху:

$$\alpha = \frac{N_u \lambda}{d}, \quad (12)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\lambda = 23 \cdot 10^{-3} \text{ кДж}/\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C}/4$;

d – диаметр капли, м ;

N_u – критерий Нуссельта.

$$d = \frac{3 \cdot 10^5}{P}, \quad (13)$$

где P – давление жидкости перед распылителем, Па :

$$P = (H_0 - H) \rho - P_0, \quad (14)$$

где H_0 – напор истечения, м ;

H – гидростатический напор, м ;

ρ – плотность жидкости (для воды $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$);

P_0 – давление над свободной поверхностью жидкости, $P_0 = P_{\text{атм}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Напор истечения определяется из уравнения для объёмного расхода жидкости через отверстия распылителей $q/5$:

$$H_0 = \frac{q^2}{2\mu^2 \omega^2 g}, \quad (15)$$

где q – расход жидкости через отверстие в распылителе, $\text{л}/\text{с}$;

μ – коэффициент расхода, $\mu = 0,64$;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Критерий Нуссельта определяется по формуле Несте-ренко /3/:

$$N_u = 2 + 1,05 R_e^{0,5} P_r^{0,33} G_u^{0,175}, \quad (16)$$

где R_e – число Рейнольдса;

P_r – число Прандля, для воздуха $P_r = 0,72$;

G_u – число Гухмана.

Число Рейнольдса:

$$R_e = \frac{\omega \cdot d}{\nu}, \quad (17)$$

где ω – скорость падения капли, $\text{м}/\text{с}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха,

$\nu = 12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Скорость падения капли:

$$\omega = 162 \sqrt{\frac{d}{\rho}} \quad (18)$$

Число Гухмана:

$$G_u = \frac{T_c - T_m}{T_m} \quad (19)$$

где T_c , T_m – температура воздуха по сухому и мокрому термометру, °C.

Количество теплоты, отводимой охладителем:

$$Q_a = c_x \cdot G_x (t_{x, \text{вх}} - t_{x, \text{вых}}) \quad (20)$$

Количество тепла, которое необходимо отвести от молока:

$$Q_m = c_m \cdot m_m \cdot (t_{m, \text{н}} - t_{m, \text{к}}) \quad (21)$$

где $t_{m, \text{н}}$ и $t_{m, \text{к}}$ – начальная и конечная температура молока, °C.

С учётом потерь 15%.

$$Q_{m, \text{п}} = Q_m + 0,15 \cdot Q_m \quad (22)$$

Время работы комбинированной установки (время охлаждения молока) должно быть меньше либо равно нормативному τ_n , равному в соответствии со стандартом 3 часам, и складывается в данном случае из времени использования холода, запасенного в баке-аккумуляторе $\tau_{\text{акум}}$, времени непосредственного использования ОМС $\tau_{\text{омс}}$, времени работы штатной молокоохладительной установки $\tau_{x, y}$

$$\tau_n \leq \tau_{\text{акум}} + \tau_{\text{омс}} + \tau_{x, y} \quad (23)$$

Время использования холода, запасенного в баке-аккумуляторе, определяется исходя из объёма бака V_o и расхода воды:

$$\tau_{\text{акум}} = V_o / G_x \quad (24)$$

При расчёте $\tau_{\text{акум}}$ значение расхода воды подставляется в м³.

Время непосредственного использования ОМС:

$$\tau_{\text{омс}} = \frac{Q_m}{Q_o} \quad (25)$$

где Q_o – количество тепла, которое необходимо отвести от молока после использования холода, запасенного в баке-аккумуляторе, кДж.

В случае, если молоко не охлаждено до заданной температуры, а $\tau_{\text{акум}} + \tau_{\text{омс}} > \tau_n$, необходимо уменьшить время работы ОМС для того, чтобы иметь возможность доохлаждения при помощи МХУ.

Время работы штатной молокоохладительной установки:

$$\tau_{x, y} = \tau_n - \tau_{\text{акум}} - \tau_{\text{омс}} \quad (26)$$

Необходимо проверить возможность доохлаждения за время, определённое по выражению (26). Проверка проводится исходя из условия:

$$\tau_{x, y} \leq \tau_p \quad (27)$$

где τ_p – время работы холодильной установки, рассчитанное исходя из её производительности:

$$\tau_p = \frac{Q_m}{Q_{x, y}} \quad (28)$$

где Q_m – количество тепла, которое необходимо отвести от молока после использования холода, запасенного в баке-аккумуляторе, и непосредственного использования ОМС, кДж;

$Q_{x, y}$ – холодопроизводительность штатной холодильной установки, кДж/ч.

При невыполнении условия (27) возникает необходимость предварительного намораживания льда холодильной установкой.

Количество холода, которое нужно запастись за счёт намораживания льда:

$$Q_n = Q_m - Q_{x, y} \cdot \tau_{x, y} \quad (29)$$

Время намораживания льда $\tau_{n, l}$:

$$\tau_{n, l} = \frac{Q_n}{Q_{x, y}} \quad (30)$$

Таким образом, для определения времени использования ОМС и штатной холодильной установки для охлаждения молока при их работе в комбинированном режиме необходимо знать параметры атмосферного воздуха (температуру, влажность, давление), технические характеристики (холодопроизводительность, подачу насоса) и конструктивные параметры установки (площади теплообменных поверхностей, активный объём теплообменного пространства).

Технические характеристики и конструктивные параметры сезоннодействующих охладителей молока, необходимые для расчётов, приведены в таблице 1.

Обсуждение результатов исследования

С учетом данных, приведенных на рисунке 2, расчёт проведём в интервале температур атмосферного воздуха 4–15°C при агрегатировании ОМС-0,5 с молокоохладителем СМ-1200, а ОМС-12 – соответственно с ТОМ-2А.

Из данных таблицы 2 видно, что охлаждение молока происходит без предварительного намораживания льда за 2 ч для ОМС-0,5 в интервале температур воздуха от +4 до +8°C, а для ОМС-12 – от +4 до +5°C.

В процентном выражении время работы комбинированной установки по сравнению со штатной молокоохладительной установкой снизится в среднем при использовании ОМС-0,5 на 47,5%, ОМС-12 – на 9%. Время работы штатной холодильной установки при работе в комбинированном режиме уменьшится в среднем при использовании ОМС-0,5 с 4 до 1,25 ч, ОМС-12 с 2,3 до 0,65 ч.

Из диаграммы рисунка 3 видно, что время работы сезоннодействующей установки в процентном выражении изменяется в заданных пределах для ОМС-0,5 от 100 до 25%.

Из диаграммы рисунка 4, представленной в виде графической зависимости времени работы элементов ком-

Таблица 1. Техничко-конструктивные показатели сезоннодействующих охладителей молока

Показатели	Единицы измерения	Модель сезоннодействующего охладителя молока	
		ОМС-0,5	ОМС-12
Хладоноситель		Вода, ГОСТ 2874-82	Вода, ГОСТ 2874-82
Подача насоса	м ³ /ч	6,0	6,0
Тип движения хладоносителя		плёночный	капельно-дисперсионный
Площадь скатных панелей	м ²	-	7,4
Активный объём теплообменного пространства	м ³	2,8	-
Объём бака-аккумулятора	м ³	1,5	0,75
Начальная температура молока	°C	35	35
Конечная температура молока	°C	6	6
Масса охлаждаемого молока за один цикл	кг	500	800

Таблица 2. Результаты расчёта времени работы элементов комбинированной системы охлаждения молока

Расчётные параметры	Заданная температура $t, ^\circ\text{C}$											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ОМС-0,5												
Время использования ОМС, ч	1,31	1,15	1,1	1,05	1,01	0,95	0,91	0,86	0,81	0,76	0,71	0,67
Время работы штатной МХУ, ч	-	0,36	0,54	0,72	0,89	1,05	1,09	1,14	1,19	1,24	1,29	1,33
Время намораживания льда, ч	-	-	-	-	-	0,04	0,17	0,29	0,43	0,56	0,69	0,82
Суммарное время работы, ч	1,31	1,51	1,64	1,77	2	2,04	2,17	2,29	2,43	2,56	2,69	2,82
ОМС-12												
Время использования ОМС, ч	2	1,8	1,74	1,64	1,56	1,47	1,42	1,35	1,29	1,21	1,13	1,06
Время работы штатной МХУ, ч	-	0,2	0,26	0,36	0,44	0,53	0,58	0,65	0,71	0,79	0,87	0,94
Время намораживания льда, ч	-	-	0,05	0,05	0,07	0,09	0,13	0,16	0,20	0,23	0,25	0,28
Суммарное время работы, ч	2	2	2,05	2,05	2,07	2,09	2,13	2,16	2,20	2,23	2,25	2,28

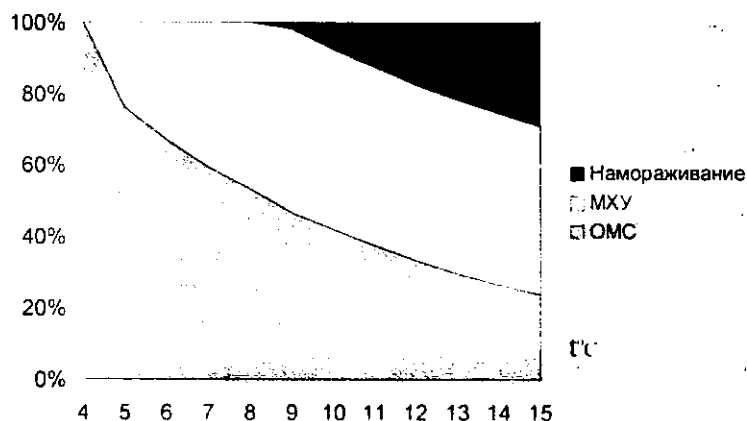


Рис.3. Изменение доли замещения электроэнергии естественным холодом в зависимости от температуры атмосферного воздуха для комбинированных систем ОМС-0,5 + CM-1200

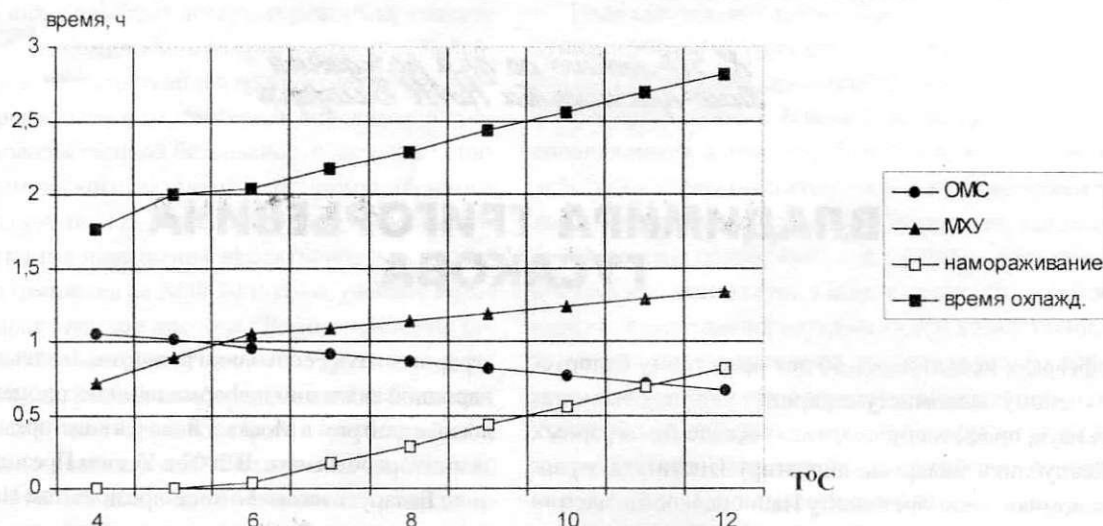


Рис. 4. Изменение времени работы элементов комбинированной системы охлаждения молока в зависимости от температуры атмосферного воздуха для ОМС-12

бинированной установки от температуры атмосферного воздуха, видно, что с ростом температуры время работы ОМС снижается; растёт время охлаждения и при превышении им 2 ч возникает необходимость в предварительном намораживании льда; время работы МХУ изменяется незначительно.

Выводы

1. Анализ климатических условий Республики Беларусь показывает, что температура атмосферного воздуха в наиболее холодное время суток в период апрель – октябрь изменяется в пределах от $-4,5$ до $+14^{\circ}\text{C}$ и учитывая, что время автономной работы ОМС ограничивается температурой атмосферного воздуха $+4^{\circ}\text{C}$, то возможный период его дополнительного использования, т.е. число дней со средней температурой воздуха в интервале $+5$ – $+15^{\circ}\text{C}$, составляет 102,9 дня.

2. На основании проведенного с использованием математической модели теплового баланса расчёта времени работы сезоннодействующих охладителей молока в комбинированном режиме со штатными холодильными установками определено, что в интервале средних температур атмосферного воздуха $+4$ – $+15^{\circ}\text{C}$ оно равно: для ОМС-0,5 – 1,31–0,67 ч, а для ОМС-12 – 2,0–1,06 ч на один цикл охлаждения. Это говорит о возможности существенного увеличения периода использования ОМС и снижения энергозатрат в процессе первичного охлаждения молока.

3. Реализация резервов повышения энергоэффективности первичной обработки молока требует создания автоматического устройства контроля и управления работой системы охлаждения молока, состоящей из современного компрессорно-конденсаторного агрегата и сезоннодействующего охлаждающего устройства, позволяющего использовать естественный холод атмосферного воздуха.

Литература

1. Daszkow W., Litowski A., Petrow K. Prawdziwy chlod – alternatywa Freony przy chłodzeniu mleka // Podstawowe problemy w technologii chowu bydla i trzody chlewniej z uwzględnieniem aspektów ekologicznych: Międzynarodowa konferencja naukowa / Instytut budownictwa, mechanizacji i elektryfikacji rolnictwa. – Warszawa, 1997. – S. 199–205.
2. Научно-прикладной справочник по климату СССР. – Ленинград, 1987. – С. 163 – 177.
3. Оптимизация параметров конструкции охладителей молока на основе математической модели процесса теплообмена / М.М. Севернёв, А.М. Литовский, О.Н. Буляк // Математическое моделирование сельскохозяйственных объектов – основа проектирования технологий и машин XXI века: Материалы Международной научной конференции. – Минск, 2001. – С. 198 – 203.
4. Бретшнайдер С. Свойства жидкостей и газов. – Москва, 1976. – С. 243.
5. Теплотехнический справочник: В 2-х томах / Под ред. В.Н. Юренина, П.Д. Лебедева. – Москва: Энергия, 1976. – Т.2. – С.559–562.