

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.171:637.11:637.13

DOI 10.26897/2687-1149-2021-3-49-55

**УСТАНОВКА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ****КИРСАНОВ ВЛАДИМИР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник¹

kirvv2014@mail.ru

ИВАНОВ ЮРИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ✉, д-р техн. наук, профессор²

iy.electro@rgau-msha.ru✉

ВЕРЛИКОВА ЛЮДМИЛА НИКОЛАЕВНА, ассистент²

lverlikova@rgau-msha.ru

КРАВЧЕНКО ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ, канд. техн. наук, доцент²

vkravchenko@rgau-msha.ru

¹ Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Аннотация. Тенденция увеличения потребления персонализированного питания открывает перспективы промышленного производства молока от индивидуальной коровы с сохраненными полезными компонентами, присущими данному животному, составом по жиру, белку, лактозе и вкусу. В качестве доильной установки рассматриваются роботы, предназначенные для индивидуального доения коров с автоматическим контролем показателей качества молока. При этом молоко, соответствующее параметрам высокого качества, поступает в пластинчатый термоэлектрический охладитель-нагреватель, затем – в упаковочный автомат, где разливается в тару, и далее подается в холодильный шкаф. Выбор в качестве охлаждающего элемента термомодулей обусловлен их высоким быстродействием и возможностью точного регулирования заданной температуры. При этом по горячей стороне термомодуля происходит нагрев воды, которая используется для технологических нужд фермы. Исследование направлено на разработку и обоснование параметров энергосберегающей установки с термоэлектрическими модулями для охлаждения нативного индивидуального молока от коровы и нагревания воды в доильных роботах для производства персонализированных продуктов питания. Представлена схема технологической линии с охлаждением молока непосредственно в процессе доения коровы. Приведены аналитические зависимости для расчета параметров установки с термоэлектрическими модулями для охлаждения по двум вариантам: скорости потока молока и параметрам циклической подачи равных порций молока. Предлагаемая технология и способ охлаждения молока в потоке с использованием термоэлектрических модулей в составе доильных роботов позволяют создать новую технологию производства высококачественной молочной продукции по индивидуальным заказам потребителей.

Ключевые слова: роботизированное доение, охладитель молока с термоэлектрическими модулями, персонализированная молочная продукция.

Формат цитирования: Кирсанов В.В., Иванов Ю.Г., Верликова Л.Н., Кравченко В.Н. Установка для охлаждения молока с использованием термоэлектрических модулей // Агроинженерия. 2021. № 3 (103). С. 49-55. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-49-55.

© Кирсанов В.В., Иванов Ю.Г., Верликова Л.Н., Кравченко В.Н., 2021



ORIGINAL PAPER

MILK COOLING UNIT BASED ON THERMOELECTRIC MODULES**VLADIMIR V. KIRSANOV**, DSc (Eng), Chief Research Engineer¹

kirvv2014@mail.ru

YURI G. IVANOV✉, DSc (Eng), Professor²

iy.electro@rgau-msha.ru✉

LYUDMILA N. VERLIKOVA, Assistant²

lverlikova@rgau-msha.ru

VLADIMIR N. KRAVCHENKO, PhD (Eng), Associate Professor²

vkravchenko@rgau-msha.ru

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russia, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5²Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; 127550, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, Russian Federation

Abstract. The tendency to increase the consumption of personalized nutrition opens up new prospects for the industrial production of milk from an individual cow with preserved useful components inherent in a specific animal species, the composition of fat, protein, lactose, and taste. A milking installation is composed of robots for individual milking of cows with automatic control of milk quality indicators. At the same time, milk corresponding to the parameters of high quality enters the thermoelectric plate-type cooler – heater, then into the packing machine, where it is bottled into containers to further proceed to the refrigerator. Thermal modules as a cooling element are chosen due to their high speed and the ability to accurately control the set temperature. At the same time, water is heated through the hot heating system of the thermal module, which is used for the technological needs of the farm. The work aims at developing and justifying the parameters of an energy-saving thermoelectric system for cooling native individual milk from a cow and heating water in milking robots for the production of personalized food products. The authors present a technological line scheme with milk cooling directly during the milking process. Analytical relationships are given for calculating the parameters of a thermoelectric cooling system according to two options – the milk flow rate and the parameters of the cyclic supply of one-time equal portions of milk. The proposed technology and method for milk cooling in the flow using thermoelectric modules as part of milking robots makes it possible to develop a new technology for the production of high-quality dairy products according to individual orders of consumers.

Key words: robotic milking, thermoelectric milk cooler, personalized dairy products.

For citation: Kirsanov V.V., Ivanov Yu.G., Verlikova L.N., Kravchenko V.N. Milk cooling unit based on thermoelectric modules. *Agricultural Engineering*, 2021; 3 (103): 49-55. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-3-49-55.

Введение. Тенденция производства персонализированных продуктов питания открывает перспективы для получения на фермах молока от коров с сохранением индивидуальных свойств, свежего вкуса и полезных компонентов¹ [1, 2].

В качестве доильной установки рассматриваются известные роботы, предназначенные для индивидуального доения коров с автоматическим контролем количества надоенного молока, содержания жира, белка и лактозы, количества соматических клеток, температуры и электропроводности молока по долям вымени, наличия крови в молоке^{2,3} [3].

Молоко, соответствующее параметрам высокого качества, поступает для охлаждения в пластинчатый термоэлектрический охладитель-нагреватель, затем – в упаковочный автомат, где разливается в тару, и далее подается в холодильный шкаф. Выбор в качестве охлаждающего элемента термомодулей обусловлен их высоким быстродействием и возможностью точного регулирования температуры⁴ [4-6]. При этом одновременно по горячей стороне термомодуля происходит нагрев воды, которая используется для технологических нужд фермы. Для обеспечения контроля безопасности и высокого качества молока предусматриваются идентификация и прослеживаемость продукта, от фермы и коровы со всеми её персональными

данными (номер коровы, время и место доения, содержание жира, белка и лактозы) до прилавка магазина. Предлагаемая технология предназначена для производства высококачественного, персонализированного продукта для здорового питания человека и является опциональной, расширяющей функции существующего роботизированного доения, предусматривающего пастеризацию и охлаждение смешанного от разных коров молока [7, 8].

Цель исследований: разработать и обосновать параметры энергосберегающей установки с термоэлектрическими модулями для охлаждения молока и нагревания воды в доильных роботах для производства персонализированных продуктов питания.

Материал и методы. Схема технологической линии представлена на рисунке 1.

Молоко, выдаиваемое от коровы на роботе 1, проходит через систему датчиков для контроля его качества в процессе доения. Посредством насоса-дозатора 3, через механический фильтр 4 молоко, соответствующее установленным показателям, через клапан 5 направляется в двухступенчатую охладительную установку 7 и 8 и далее, через клапаны 10 и 11, – в установку 12 для розлива в тару: например, ёмкостью 1,0 л с нанесением комплекса индивидуальных показателей молока, животного и предприятия. Последняя, неполная порция молока от каждой коровы, и разовые надои менее двух или трех литров направляются в танк-охладитель 13 для сборного молока от всех коров. Это молоко также разливается в тару с указанием на этикетке того, что это сборное молоко. Управляемый трехходовый кран 5, снабженный электромагнитным приводом, направляет поток некондиционного молока от больных коров и с отклонениями показателей от нормативных значений в отдельные ёмкости – фляги 6. Для управления технологическим процессом предусмотрены датчики потока и температуры молока, а также контроллер.

¹ Hoherhitzte Milch: Ein Hoch auf die neue Milch. URL: <https://www.test.de/Hoherhitzte-Milch-Ein-Hoch-auf-die-neue-Milch-1145760-1145761/> (дата обращения: 10.03.2021).

² Робот для счастливых коров. URL: <http://agrostory.com/info-centre/knowledge-lab/robot-for-happy-cows/> (дата обращения: 10.03.2021).

³ Официальный сайт компании Lely. URL: <https://www.lely.com/ru> (дата обращения: 10.03.2021).

⁴ Официальный сайт компании Криотерм. URL: <http://kryothermtec.com/ru/> (дата обращения: 10.03.2021).

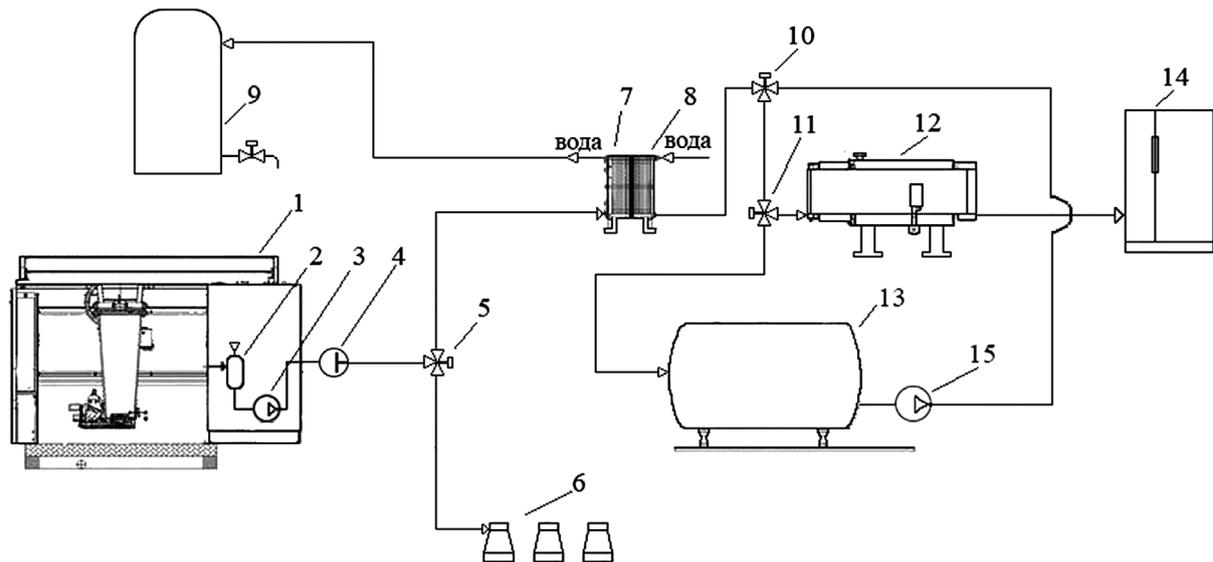


Рис. 1. Схема технологической линии:

1 – робот для доения; 2 – молокосорная колба; 3 – насос-дозатор; 4 – фильтр; 5, 10, 11 – управляемый трехходовой кран; 6 – отдельные ёмкости; 7 и 8 – охлаждающе-нагревательная установка; 9 – резервуар-термос для хранения нагретой воды; 12 – установка для розлива, упаковки и маркировки; 13 – танк-охладитель для сборного молока; 14 – холодильник для доохлаждения и хранения расфасованного молока; 15 – насос-дозатор для сборного молока

Fig. 1. Scheme of the technological line:

1 – milking robot; 2 – milk collection flask; 3 – dosing pump; 4 – filter; 5, 10, 11 – controlled three-way valve; 6 – separate containers; 7 and 8 – cooling and heating unit; 9 – thermos tank for storing heated water; 12 – installation for filling, packaging and labeling; 13 – tank cooler for bulk milk; 14 – refrigerator for additional cooling and storage of packaged milk; 15 – dosing pump for bulk milk

В охлаждающе-нагревательной установке применены термоэлектрические модули (GM) на основе элементов Пельтье, обеспечивающие, с одной стороны, охлаждение молока, а с другой – нагрев воды, необходимой для технологических нужд (рис. 2).

Основным требованием к работе технологической линии является охлаждение выдаваемого молока непосредственно в процессе доения коровы.

Процесс охлаждения выдаваемого молока рассматривается в двух вариантах.

В первом варианте непосредственно в процессе доения выдаваемое молоко насосом-дозатором через охлаждающе-нагревательную установку 7 и 8 подается в приемную ёмкость установки 11 для розлива, упаковки и маркировки. Критерием управления является скорость потока выдаваемого молока, регистрируемого соответствующим датчиком.

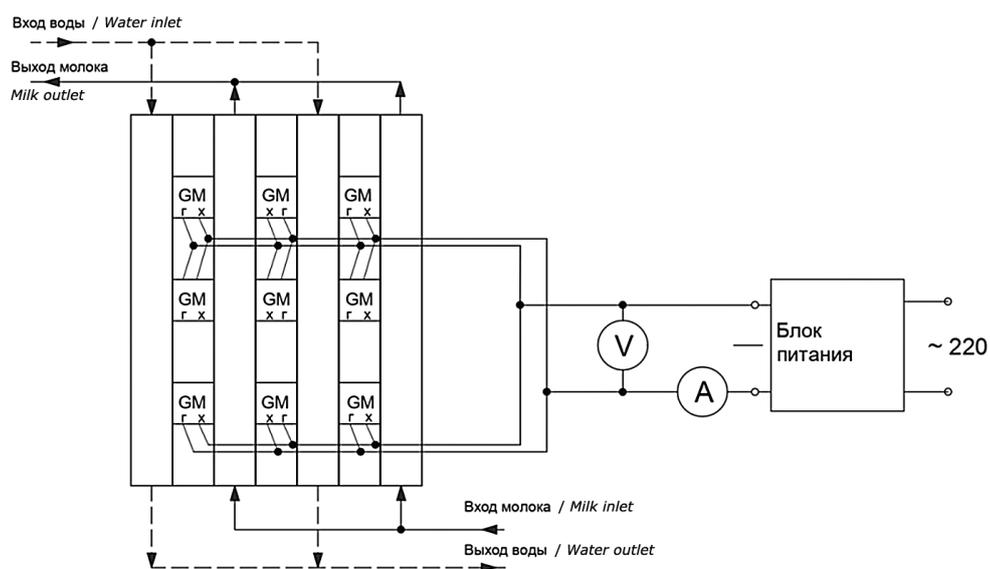


Рис. 2. Схема охлаждающе-нагревательной установки с термомодулями:

GM – термомодули; г – горячая сторона термомодуля; х – холодная сторона термомодуля

Fig. 2. Scheme of a cooling and heating installation based on thermal modules:

GM – thermal modules; г – hot side of the thermal module; х – cold side of the thermal module

Во втором варианте выдаваемое молоко порциями, равными объему тары, насосом-дозатором направляется для охлаждения в двухступенчатую установку 7 и 8 и далее – в установку 11 для розлива. При этом критерием управления являются параметры циклического процесса подачи разовых равных порций молока.

Результаты и обсуждение. Произведем расчет термоэлектрической системы «Охлаждение-нагревание». При этом нагрев воды в системе будет осуществляться рекуперативно за счет переноса теплоты от охлаждаемого объекта – молока.

Выделение теплоты Пельтье определится в соответствии с выражением [8]:

$$Q_i = \bar{\alpha}IT, \quad (1)$$

где I – сила тока, А; T – абсолютная температура спая, °С; $\bar{\alpha}$ – суммарный коэффициент термоэдс.

Прохождение тока вызывает выделение теплоты по закону Джоуля во всем объеме вещества термомодуля:

$$Q_{дж} = I^2 R = I^2 [l / (\sigma_p S_p) + l / (\sigma_n S_n)] \quad (2)$$

где R – электрическое сопротивление термоэлемента, Ом; l – длина ветви термоэлемента, мм; σ_p, σ_n – соответственно удельные электропроводности ветвей p и n -типа, Ом/м; S_p, S_n – площади сечения ветвей p -типа и n -типа, мм².

Теплота, перетекающая от горячего спая к холодному за счет теплопроводности материала термомодуля, –

$$Q_\tau = R\Delta T = (\xi_p S_p / l + S_n \xi_n / l) \Delta T, \quad (3)$$

где ξ_p, ξ_n – соответственно коэффициенты теплопроводности ветвей p и n -типа; ΔT – разность температур между спаями, °С.

Количество теплоты Томсона:

$$Q_\tau = (\tau_1 - \tau_2 / \Delta T), \quad (4)$$

где τ_1, τ_2 – коэффициенты Томсона.

Коэффициент Томсона имеет положительный знак, если градиент $da/dT > 0$, и отрицательный, если $da/dT < 0$.

Работа термомодуля в режиме охлаждения запишется как

$$Q_0 = Q_n - (Q_{дж} / 2) - Q_\tau, \quad (5)$$

где Q_0 – количество теплоты, поглощаемой спаем (холодопроизводительность), Вт; Q_n – поглощение или выделение (в зависимости от направления тока) теплоты Пельтье, Вт; $Q_{дж} / 2$ – теплота, выделяемая в термомодуле, отнесенная к одной пластине, Вт; Q_τ – теплота, перетекающая от горячей пластины к холодной, Вт.

Для равных сечений термоэлемента и средних значений σ и ξ

$$Q_0 = \bar{\alpha}IT_x - I^2 l / (\sigma S) - \xi \Delta T 2S / l, \quad (6)$$

где T_x – абсолютная температура холодного спая, °С.

Теплота, снимаемая с горячих спаев, –

$$Q_\tau = Q_n + (Q_{дж} / 2) - Q_\tau = \bar{\alpha}IT_\tau + I^2 l / (\sigma S) - 2S \xi \Delta T / l = Q_0 + W, \quad (7)$$

где T_τ – абсолютная температура горячего спая, °С; W – электрическая мощность, потребляемая термоэлементом, кВт·ч.

Экономичность работы термоэлектрического холодильника оценивается холодильным коэффициентом ε :

$$\varepsilon = Q_0 / W = (\bar{\alpha}IT_x - I^2 R / 2 - 2S \xi \Delta T / l) / (\bar{\alpha}I \Delta T + I^2 R), \quad (8)$$

Как известно, общий тепловой поток через произвольную поверхность теплообмена определяется интегралом

$$Q = \int_0^F K \Delta t dF, \quad (9)$$

где F – поверхность теплообмена, м²; Δt – разность температур, °С; dF – элементарная площадка теплообмена; K – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°С.

Площадь поверхности одной теплообменной пластины можно выразить через площадь термоэлектрических модулей:

$$f_{пл} \approx K_3 \cdot \sum_{i=1}^n f_{ТЭМ}, \quad (10)$$

где $f_{пл}$ – площадь одной теплообменной пластины, м²; $f_{ТЭМ}$ – площадь, занимаемая одним термомодулем, м²; n – число термомодулей, расположенных на одной пластине; K_3 – коэффициент заполнения пластины термомодулями (0,6...0,8).

Для плоской многослойной стенки коэффициент теплопередачи находится из уравнения:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (11)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой жидкости стенке; δ_i – толщина теплообменных пластин, мм; λ_i – теплопроводность материала, Дж/кг·°С; α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости.

При условии стационарности теплового потока отбираемая от охлаждаемой жидкости теплота определяется по формуле:

$$Q = FK \Delta t_{cp}. \quad (12)$$

Определяем по известным методикам Δt_{cp} с небольшим допущением:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}}, \quad (13)$$

где $\Delta t_{max}, \Delta t_{min}$ – соответственно максимальная и минимальная разность температур между охлаждаемой жидкостью и стенкой термомодулей, °С.

С другой стороны, теплота Q отводится термомодулем, работающим в режиме охлаждения, поэтому

$$Q = Q_0. \quad (14)$$

Подставляя соответствующие значения из уравнений (6), (11-13) в (14), получим:

$$F_x \left(\frac{1}{\alpha_1 + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \right) \left(\frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}} \right) = \bar{\alpha}IT_x - I^2 l / (\sigma S) - \xi \Delta T 2S / l. \quad (15)$$

Искомая поверхность теплообмена F_x по холодной стороне выразится как

$$F_x = \frac{\bar{\alpha}IT_x - I^2 l / (\sigma S) - \xi \Delta T 2S / l}{\left(\frac{1}{\alpha_1 + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \right) \ln \frac{\Delta t_{max}}{\Delta t_{min}}}. \quad (16)$$

В выражении (16) следует опустить лишь величину $\frac{1}{\alpha_2}$, поскольку конвективный теплообмен между термомодулем и пластиной отсутствует.

Величину $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ можно выразить следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta_{пл}}{\lambda_{пл}} + \frac{\delta_{п.м}}{\lambda_{п.м}}, \quad (17)$$

где $\delta_{пл}$, $\delta_{п.м}$ – соответственно толщина теплообменной пластины и термомодуля, м; $\lambda_{пл}$, $\lambda_{п.м}$ – теплопроводность материала пластины и пластина термомодуля, Вт/кг·°С.

С учетом принятых соображений перепишем выражение (16):

$$F_x = \frac{\bar{\alpha}I\Gamma_x - I^2l/(\sigma S) - \xi\Delta T 2S/l \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{пл}}{\lambda_{пл}} + \frac{\delta_{п.м}}{\lambda_{п.м}} \right) \ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}}{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}. \quad (18)$$

Искомое число пластин Z определяется как

$$Z = \frac{F}{f_{пл}} = \frac{F}{\sum_{i=1}^n f_{тэм}}. \quad (19)$$

С другой стороны, чтобы обеспечить передачу теплоты $Q = Q_0$ на холодной стороне, необходимо с горячей стороны термомодулей отвести теплоту:

$$Q_r = Q_0 + W_0. \quad (20)$$

Теплота Q_r отводится через поверхность F_r :

$$Q_r = \alpha_r \Delta T_r F_r; \quad (21)$$

$$\Delta T_r = T_r - T_b, \quad (22)$$

где T_r , T_b – соответственно температура горячей стенки термомодуля и температура охлаждающей (нагреваемой) воды, °С.

Подставляя в формулу (21) значения соответствующих параметров Q_r (7), ΔT_r (22) и выражая относительно F_r , запишем:

$$F_r = \frac{Q_r}{\alpha_r \Delta T_r} = \frac{\bar{\alpha}I\Gamma_r + I^2l/(\sigma S) - 2S\xi\Delta T/l}{\alpha_r (T_r - T_b)}. \quad (23)$$

Теплота Q_r будет отводиться потоком q_r , омывающим «горячую» сторону термомодулей, в нашем случае – потоком нагреваемой воды для технологических нужд (например, на мойку доильного робота):

$$Q_r = K_r F_r \Delta t_{cp} = q_r C_r (t_h^r - t_k^r). \quad (24)$$

Коэффициент теплопередачи по «горячей» стороне запишется по аналогии с «холодной» стороной:

$$K_r = \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{пл}}{\lambda_{пл}} + \frac{\delta_{п.м}}{\lambda_{п.м}} \right), \quad (25)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи от пластины нагреваемой жидкости.

Величина « Δt_{cp} » также определится с учетом (13):

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{max}^r - \Delta t_{min}^r}{\ln \frac{\Delta t_{max}^r}{\Delta t_{min}^r}}, \quad (26)$$

где Δt_{max}^r , Δt_{min}^r – соответственно максимальная и минимальная разности температур между горячей стенкой термомодуля и нагреваемой средой.

С учетом полученных выражений (23-26) уравнение теплового баланса для горячей стороны запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}I\Gamma_r + I^2l/(\sigma S) - 2S\xi\Delta T/l &= q_r C_r (t_h^r - t_k^r) = \\ &= \left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{пл}}{\lambda_{пл}} + \frac{\delta_{п.м}}{\lambda_{п.м}} \right) F_r \Delta t_{cp}^r. \end{aligned} \quad (27)$$

С учетом последнего получим систему расчетных уравнений:

$$q_r = \frac{\bar{\alpha}I\Gamma_r + I^2l/(\sigma S) - 2S\xi\Delta T/l}{C_r (t_h^r - t_k^r)}; \quad (28)$$

$$F_r = \frac{\bar{\alpha}I\Gamma_r + I^2l/(\sigma S) - 2S\xi\Delta T/l}{\left(\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{пл}}{\lambda_{пл}} + \frac{\delta_{п.м}}{\lambda_{п.м}} \right) \left(\frac{\Delta t_{max}^r - \Delta t_{min}^r}{\ln \frac{\Delta t_{max}^r}{\Delta t_{min}^r}} \right)}. \quad (29)$$

Аналитическую систему уравнений можно получить и по холодной стороне, добавив к уравнению (18) уравнение для q_x , полученное по аналогии с выражением (28):

$$Q_0 = q_x C_x (t_h^x - t_k^x). \quad (30)$$

Подставляя значение Q_0 (6) и решая относительно q_x , окончательно получим:

$$q_x = \frac{\bar{\alpha}I\Gamma_x - I^2l/(\sigma S) - \xi\Delta T 2S/l}{C_x (t_h^x - t_k^x)}. \quad (31)$$

Запишем важное для любого теплообменника соотношение расходов охлаждаемой и нагреваемой жидкости $\frac{q_x}{q_r}$:

$$i = \frac{q_x}{q_r} = \frac{\bar{\alpha}I\Gamma_x - I^2l/(\sigma S) - \xi\Delta T 2S/l C_r (t_h^r - t_k^r)}{C_x (t_h^x - t_k^x) \left(\bar{\alpha}I\Gamma_r + I^2l/(\sigma S) - \frac{2S\xi\Delta T}{l} \right)}. \quad (32)$$

Приведенные выше уравнения были получены для режима работы «Напроход», когда охлаждаемое молоко и нагреваемая вода движутся непрерывно. Вместе с тем для доильных установок характерен режим импульсной подачи, когда молоко из молокоприемника откачивается циклически определенными порциями. В доильном роботе молоко, как правило, перекачивается по окончании доения коровы и проходит через предохладитель в танк-охладитель для сборного молока. В нашем случае молоко должно быть охлаждено до определенной температуры хранения, розлито, упаковано и помещено в холодильную камеру на хранение перед отправкой потребителю. В этом случае глубину охлаждения можно варьировать от конечной (4°С) до промежуточной 8...10°С

температур с последующим доохлаждением в холодильной камере.

В любом случае при работе доильного робота целесообразно рассмотреть режим циклической (порционной) подачи молока на обработку, чтобы увеличить глубину охлаждения при постоянной мощности термоэлементов за счет дополнительного охлаждения порции молока, оставшейся в межпластинчатом зазоре охладителя между циклами включения молочного насоса. При этом целесообразно объем полостей охладителя (V_0) сделать равным объему регулируемой откачиваемой порции молока (V_p). Тогда при разовом удое одной коровы ($q_p = 10$ л) и среднем времени доения ($t_d = 6$ мин) величина среднего охлаждаемого потока молока ($q_{ср}$) составит $10:6 = 1,67$ л/мин. При циклической подаче молока на обработку равными порциями, например, по 1 л, продолжительность одного цикла охлаждения молока будет равна

$$t_{ц} = t_d V_p / Q_p = 6 \cdot 1 / 10 = 0,6 \text{ мин} = 36 \text{ с.} \quad (33)$$

Это достаточно много по сравнению со временем пребывания в межпластинчатом зазоре при охлаждении «Напроход» порядка 4-5 с. За это время молоко успеет охладиться до более низкой температуры, чем в режиме «Напроход».

Количество теплоты, отбираемое от 1 кг молока за цикл охлаждения, можно определить по известной зависимости:

$$Q_{ц}^m = \rho_m V_p c_m (t_n - t_k), \quad (34)$$

где ρ_m – плотность молока ($1,033 \text{ кг/м}^3$), c_m – удельная теплоёмкость молока, $3900 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$; t_n, t_k – соответственно начальная (32°C) и конечная температура молока ($4 \dots 8^\circ\text{C}$).

С другой стороны, величину $Q_{ц}^m$ можно выразить через суммарную холодопроизводительность установленных термомодулей $\sum q^{\text{ТЭМ}}$ с учетом коэффициента запаса (1,1...1,15):

$$\sum q^{\text{ТЭМ}} = (1,1 \dots 1,15) Q_{ц}^m, \quad (35)$$

или с учетом выражения (34) окончательно получим:

$$\sum q^{\text{ТЭМ}} = (1,1 \dots 1,15) \rho_m V_p c_m (t_n - t_k). \quad (36)$$

В свою очередь, величину V_p можно выразить как сумму объемов межпластинчатых каналов охладителя:

$$V_p = b_o h_o l_o n_k, \quad (37)$$

где b_o, h_o, l_o – соответственно ширина, высота и длина одного канала; n_k – количество каналов в охлаждающей секции.

С учетом (37) выражение (36) переписывается как

$$\sum q^{\text{ТЭМ}} = (1,1 \dots 1,15) \rho_m b_o h_o l_o n_k c_m (t_n - t_k). \quad (38)$$

Необходимое время τ пребывания молока в охладителе можно определить из уравнения теплового баланса:

$$Q_{ц}^m = KF \Delta t_{ср} \tau, \quad (39)$$

Библиографический список

1. Юрк Н.А., Динер Ю.А. К вопросу обеспечения производственной безопасности инновационных продуктов персонализированного питания // Перспективы развития отрасли и предприятий АПК: отечественный и международный опыт: Сборник материалов Международной

или с учетом (34) запишем:

$$\rho_m V_p c_m (t_n - t_k) = KF \Delta t_{ср} \tau. \quad (40)$$

Выражая V_p и F через размеры пластин (b_o, h_o, l_o), производя соответствующие сокращения и решая относительно τ , получим:

$$\tau = \rho_m h_o c_m (t_n - t_k) / K \Delta t_{ср}. \quad (41)$$

В расчетах можно принять величину коэффициента теплопередачи « K » как для танков-охладителей ($1800 \dots 2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Величина среднего температурного напора в канале между молоком и термомодулем $\Delta t_{ср}$ определяется экспериментально. При этом величина τ не должна превышать продолжительность цикла охлаждения 35-40 с. На основе данной технологии возможны также различные варианты обработки молока для его более длительного хранения (термизация, пастеризация) с переключением режима работы термомодулей с охлаждения на нагревание.

Пример расчета.

По формуле (34) определяем количество теплоты, отбираемое от 1 кг молока за цикл охлаждения:

$$Q_{ц}^m = \rho_m V_p c_m (t_n - t_k) = 1033 \cdot 0,001 \cdot 3900 \cdot (32 - 4) = 11283,6 \text{ Дж.} \quad (42)$$

Далее определяем суммарную установленную мощность термомодулей N (Вт) по формуле (35), учитывая, что $\sum q^{\text{ТЭМ}} = N \cdot \tau$:

$$N \cdot \tau = (1,1 \dots 1,15) Q_{ц}^m. \quad (43)$$

Решая относительно N с учетом подставления значений, получим:

$$N = (1,15 \cdot 112803,6) : 36 = 3603,4 \text{ Вт.} \quad (44)$$

Зная холодопроизводительность одного модуля (например, 79 Вт), легко подсчитать общее число термомодулей n :

$$n = 3603,4 : 79 = 45. \quad (45)$$

Задаваясь размерами пластины, можно вычислить вместимость (м^3) одного канала и число каналов (37), а зная геометрические размеры пластины и геометрические размеры модуля, можно рассчитать количество термомодулей на одной пластине.

Выводы

Предлагаемая технология и способ охлаждения молока в потоке с использованием термоэлектрических модулей в составе доильных роботов позволяют создать новую технологию производства высококачественной молочной продукции по индивидуальным заказам потребителей.

References

1. Yurk N.A., Diner Yu.A. K voprosu obespecheniya proizvodstvennoy bezopasnosti innovatsionnykh produktov personalizirovannogo pitaniya [On ensuring industrial product security for personalized food ration]. *Perspektivy razvitiya otrasli i predpriyatiy APK: otechestvennyy*

научно-практической конференции. Омск: ФГБОУ ВО Омский ГАУ, 2020. С. 490-494.

2. Шваб Е.Э., Сафралиев Ш.Н., Дубняк Я.В. Значение персонализированного питания в жизни современного человека // В сб.: Инновации и технологии в биомедицине. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2020. С. 9-12.

3. Гулсен Ян. Роботизированное доение. Серия Future Farming («Фермерство будущего») «Роботизированное доение», 2011. 53 с. <https://issuu.com/agrodelo.ru/docs/book-robot-milking>.

4. Измайлов А.Ю., Цой Ю.А., Кирсанов В.В. Технологические основы алгоритмизации и цифрового управления процессами молочных ферм. М.: Инфра-М, 2019. 208 с.

5. Кирсанов В.В., Кравченко В.Н., Филонов Р.Ф. Применение термоэлектрических модулей в пастеризационно-охладительных установках для обработки жидких продуктов: Монография. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, 2011. 88 с.

6. Шостаковский П. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской промышленной и бытовой техники // Компоненты и технологии. 2020. № 1. С. 102-109.

7. Иванов Ю.Г., Габдуллин Г.Г., Атаманкина Л.Н. Обоснование структурной схемы получения высококачественного молока с индивидуальными особенностями коров на роботизированных фермах // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3 (28). С. 561-570.

8. Иванов Ю.Г., Машошина Е.В., Верликова Л.Н. Структура технических средств линии получения молока коров с индивидуальным составом // Техника и технологии в животноводстве. 2020. № 4 (40). С. 39-43.

i mezhdunarodnyy opyt: Sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Omsk, Omsk GAU, 2020: 490-494. (In Rus.)

2. Shvab E.E., Safraliev Sh.N., Dubnyak Ya.V. Znachenie personalizirovannogo pitaniya v zhizni sovremennogo cheloveka [Importance of personalized food in the life of a modern person]. In: *Innovatsii i tekhnologii v biomeditsine.* Vladivostok: Dal'nevostochnyy federal'nyy universitet, 2020: 9-12. (In Rus.)

3. Gulsen Jan. Robotic milking. "Future Farming" series – "Robotic milking". 2011: 53. <https://issuu.com/agrodelo.ru/docs/book-robot-milking>

4. Izmaylov A. Yu, Tsoy Yu.A., Kirsanov V.V. Tekhnologicheskie osnovy algoritmizatsii i tsifrovogo upravleniya protsessami molochnykh ferm [Technological basics of algorithmization and digital control of dairy farms processes]. Moscow, Infra-M, 2019: 208. (In Rus.)

5. Kirsanov V.V., Kravchenko V.N., Filonov R.F. Primeniye termoelektricheskikh moduley v pasterizatsionno-okhladitel'nykh ustanovkakh dlya obrabotki zhidkikh produktov: Monografiya [Use of thermoelectric modules in pasteurization and cooling plants for the processing of liquid products: Monograph]. Moscow, FGBOU VPO MGAU, 2011: 88. (In Rus.)

6. Shostakovskiy P. Sovremennye resheniya termoelektricheskogo okhlazhdeniya dlya radioelektronnoy, meditsinskoy promyshlennoy i bytovoy tekhniki [Modern solutions of thermoelectric cooling for radio-electronic, medical industrial and household appliances]. *Komponenty i tekhnologii*, 2020; 1: 102-109. (In Rus.)

7. Ivanov Yu.G., Gabdullin G.G., Atamankina L.N. Obosnovaniye strukturnoy skhemy polucheniya vysokokachestvennogo moloka s individual'nymi osobennostyami korov na robotizirovannykh fermakh [Determination of the structural scheme of obtaining high-quality milk taking into account individual features of cows on robotized farms]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2018; 3 (28): 561-570. (In Rus.)

8. Ivanov Yu.G., Mashoshina E.V., Verlikova L.N. Struktura tekhnicheskikh sredstv linii polucheniya moloka korov s individual'nym sostavom [Technical structure of the line for getting cow's milk with individual composition]. *Tekhnika i tekhnologii v zhivotnovodstve*, 2020; 4 (40): 39-43. (In Rus.)

Критерии авторства

Кирсанов В.В., Иванов Ю.Г., Верликова Л.Н., Кравченко В.Н. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Кирсанов В.В., Иванов Ю.Г., Верликова Л.Н., Кравченко В.Н. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 29.03.2021

Одобрена после рецензирования 19.05.2021

Принята к публикации 20.05.2021

Contribution

V.V. Kirsanov, Yu.G. Ivanov, L.N. Verlikova, V.N. Kravchenko performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. V.V. Kirsanov, Yu.G. Ivanov, L.N. Verlikova, V.N. Kravchenko have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 29.03.2021

Approved after reviewing 19.05.2021

Accepted for publication 20.05.2021