

УДК 005.591.1:637.116

А. В. Китун¹, доктор технических наук, профессор,
В. И. Передня², доктор технических наук, профессор,
П. Ю. Крупенин³, кандидат технических наук, доцент,
В. Г. Филатов⁴, **И. В. Дубень**⁵, кандидат технических наук, доцент

¹Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by

²Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по механизации сельского хозяйства», ул. Кнорина, 1, 220049 Минск, Республика Беларусь

³Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com

⁴Открытое акционерное общество «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш», ул. Шинная, 5, 213822 Бобруйск, Республика Беларусь, delo@agromash.by

⁵Учреждение образования «Барановичский государственный университет», ул. Войкова, 21, 225404 Барановичи, Республика Беларусь

ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ЛИНИИ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ МОЛОКА

Снижение затрат труда на единицу продукции животноводства немислимо без рационального использования оборудования для механизации процессов первичной обработки молока на животноводческом предприятии при одновременном обеспечении оптимального управления производством, повышении качества и снижении себестоимости выпускаемой продукции. Эти требования могут быть успешно выполнены при соответствующем совершенствовании производственных процессов в ходе их развития путем более полной замены труда человека машинным трудом.

Первичная обработка молока включает в себя следующие технологические операции: очистка молока от механических примесей, охлаждение, хранение, а в отдельных случаях еще сепарирование и пастеризация. В статье описана методика технологических расчетов линии первичной обработки молока на ферме. Рассмотрена взаимосвязь производительности линии первичной обработки молока с конструктивными параметрами такого оборудования, как центробежный очиститель молока, сепаратор и пастеризатор.

Ключевые слова: очистка молока; охлаждение молока; центробежный очиститель; сепаратор; пастеризатор; теплообменный аппарат.

Рис. 1. Библиогр.: 6 назв.

A. V. Kitun¹, DSc in Technical Sciences, Professor,
V. I. Perednya², DSc in Technical Sciences, Professor,
P. Y. Krupenin³, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
V. G. Filatov⁴, **I. V. Duben**⁵, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

¹Educational Institution “Belarusian State Agrarian Technical University”, 99 Nezavisimosti Prospect, 220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

²Republican Unitary Enterprise “The Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus on agricultural mechanization”, 1 Knorina Str., 220049 Minsk, the Republic of Belarus

³Educational Institution “Belarusian State of the Orders of October Revolution and Labor Red Banner Agricultural Academy”, 5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

⁴JSC “Management Company of the “Bobruiskagromash Holding”, 5 Shinnaya Str., 213822 Bobruisk, the Republic of Belarus, delo@agromash.by

⁵Educational Institution “Baranovichi State University”, 21Voykova Str., 225404 Baranovichi, the Republic of Belarus

OPTIMIZATION OF THE EQUIPMENT CHOICE FOR A PRIMARY MILK PROCESSING LINE

Reducing labor costs per unit of livestock production is unthinkable without the rational use of equipment for the mechanization of the primary processing of milk at a livestock enterprise, while ensuring optimal production management, improving the quality and reducing the cost of products. These requirements can be successfully done

with the appropriate improvement of production processes during their development by more complete replacement of human labor by machine.

The primary processing of milk includes the following technological operations: cleaning milk, cooling, storage, and in some cases also separation and pasteurization. The article describes the method of technological calculations of the primary milk processing line on the farm. The relationship between the capacity of the milk primary processing line and the design parameters of such equipment as a centrifugal milk purifier, separator and pasteurizer is considered.

Key words: milk purification; milk cooling; centrifugal cleaner; separator; pasteurizer; heat exchanger.

Fig. 1. Ref.: 6 titles.

Введение. Предприятия животноводческого комплекса представляют собой сложную систему, состоящую из совокупности взаимосвязанных элементов — логистических звеньев, между которыми установлены функциональные связи и отношения. До недавнего времени производители животноводческой продукции не придавали серьезного значения созданию специальных систем, позволяющих оптимизировать управление материальными потоками на предприятии. Системы распределения, как правило, не планировались, а система управления процессами товародвижения была слабой [1].

В связи с этим разработка стратегического и тактического планирования технологических процессов на животноводческом предприятии должна сочетать в себе использование современных форм организации производства и требований эффективного контроля за движением производственных потоков [2].

Материалы и методы исследования. Получение в условиях хозяйств молока наивысшего сорта является одним из наиболее важных условий роста рентабельности его производства. Отсюда понятно, насколько важна первичная обработка и охлаждение молока в условиях хозяйств [3].

В основу работы по организации поточной механизированной технологии должны быть положены оптимальные варианты перспективных, текущих и оперативных схем технологического процесса первичной обработки молока.

Результаты исследования и их обсуждение. Первичная обработка молока включает в себя следующие технологические операции: очистка молока от механических примесей, охлаждение, хранение, а в отдельных случаях еще сепарирование и пастеризация [4].

Общее количество молока, подлежащее первичной обработке в течение года, определяется по формуле

$$M_{\text{год}} = Y_{\text{год}} \Pi_{\text{к}},$$

где $Y_{\text{год}}$ — среднегодовой удой молока на одну корову, кг;

$\Pi_{\text{к}}$ — поголовье коров на ферме.

Максимальный суточный удой молока

$$M_{\text{сут}} = \frac{M_{\text{год}} K_{\text{г}} K_{\text{ск}}}{365},$$

где $K_{\text{г}}$ — коэффициент, учитывающий годовую неравномерность производства молока;

$K_{\text{ск}}$ — коэффициент, учитывающий сухостойность коров.

Максимальный разовый удой (за одну дойку)

$$M_{\text{раз}} = \frac{M_{\text{сут}} K_{\text{с}}}{i_{\text{д}}},$$

где $K_{\text{с}}$ — коэффициент суточной неравномерности производства молока;

$i_{\text{д}}$ — число доек за день.

Минимальная пропускная способность (кг / с) линии первичной обработки молока, используемая в дальнейшем для подбора ее оборудования по производительности, определяется из соотношения

$$Q_{\text{л}} = \frac{M_{\text{раз}}}{T_{\text{д}}},$$

где $T_{\text{д}}$ — допустимое время на обработку разового удоя, с.

Первая операция после дойки — очистка молока. Для наиболее тонкой очистки молока после доения применяют центробежные молокоочистители, в которых в поле центробежных сил плотные включения смещаются к периферии вращающегося барабана (частота вращения — порядка 8 000 об / мин), а более легкие вытесняются к оси вращения. Очищенное молоко за счет поступления в барабан свежего молока поднимается к напорному диску, через который выводится из барабана.

Пропускную способность центробежного молокоочистителя (кг / с) определяют по зависимости [3]

$$Q_{\text{м.о}} = \rho_{\text{м}} z_{\text{т}} R_{\text{мин}}^2 \omega_{\text{рот}}^2 B_0^2 d_{\text{гр}} \frac{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{пл}}}{\mu} \cos \alpha,$$

где $\rho_{\text{м}}$ — плотность цельного молока, кг / м³;
 $z_{\text{т}}$ — число тарелок очистительного барабана, шт.;
 $R_{\text{мин}}$ — минимальный радиус тарелки, м;
 $\omega_{\text{рот}}$ — угловая скорость вращения барабана, рад / с;
 B_0 — расстояние между тарелками барабана, м;
 $d_{\text{гр}}$ — средний эквивалентный диаметр грязевых частиц, м;
 $\rho_{\text{гр}}$ — плотность грязевых частиц, кг / м³;
 $\rho_{\text{пл}}$ — плотность плазмы молока, кг / м³;
 μ — коэффициент динамической вязкости молока, Па · с;
 α — угол наклона образующей тарелки, рад.

Количество центробежных молокоочистителей выбирают в зависимости от часовой производительности поточной линии:

$$n_{\text{м.о}} = \frac{Q_{\text{л}}}{Q_{\text{м.о}}}.$$

Длительность непрерывной работы сепаратора-очистителя должна обеспечить обработку молока в течение времени доения $T_{\text{д}}$ без разборки сепаратора:

$$T_{\text{м.о}} = \frac{V_{\text{гр}} \rho_{\text{гр}}}{C_{\text{гр}} Q_{\text{м.о}}},$$

где $V_{\text{гр}}$ — объем грязевого пространства барабана, м³;
 $C_{\text{гр}}$ — массовая доля грязевых частиц (сепараторной слизи) в молоке, $C_{\text{гр}} = (0,3...0,6) \cdot 10^{-3}$.

В том случае, если $T_{\text{м.о}} > T_{\text{д}}$, в технологическую линию устанавливают дополнительные магистральные фильтры, уменьшающие загрязненность молока, поступающего в центробежный очиститель.

На некоторых молочно-товарных фермах, а также на предприятиях молочной промышленности осуществляют переработку молока, предусматривающую разделение молока на сливки и обрат сепарированием на механических центрифугах в поле центробежных сил. При этом более плотные составляющие смеси — обезжиренное молоко (обрат) — перемещаются к периферии вращающегося ротора, более легкие — сливки — вытесняются к его центру (рисунок 1).

Разделение молока на сливки и обрат осуществляется в сливоотделительном барабане, состоящем из пакета разделительных тарелок. Тарелки имеют соосные отверстия, в результате чего в пакете образуется три вертикальных канала для прохода молока. Зазор между соседними тарелками в пакете составляет порядка 0,35...0,50 мм.

Производительность тарельчатого сепаратора (кг / с) для выделения сливок из молока определяется по формуле [3]

$$Q_{\text{сеп}} = \rho_m z_T \operatorname{tg} \alpha (R_{\text{max}}^2 - R_{\text{min}}^2) \omega_{\text{рот}}^2 d_{\text{ш}}^2 \frac{\rho_{\text{пл}} - \rho_{\text{ш}}}{\mu} \eta_{\text{сеп}},$$

где R_{max} , R_{min} — большой и меньший радиусы тарелки, м;
 $d_{\text{ш}}$ — диаметр жирового шарика, м;
 $\rho_{\text{ш}}$ — плотность жирового шарика, м;
 $\eta_{\text{сеп}}$ — КПД сепаратора, $\eta_{\text{сеп}} = 0,5 \dots 0,7$.

В интервале температур $t = 40 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$, используемых при сепарировании молока, действует зависимость $(\rho_{\text{пл}} - \rho_{\text{ш}}) / \mu = 2900t$, с учетом которой производительность тарельчатого сепаратора может быть записана в следующем виде:

$$Q_{\text{сеп}} = 2900 \rho_m z_T \operatorname{tg} \alpha (R_{\text{max}}^2 - R_{\text{min}}^2) \omega_{\text{рот}}^2 d_{\text{ш}}^2 t \eta.$$

Пренебрегая потерями при сепарировании, количество сливок, получаемых из цельного молока, определяют по формуле

$$G_c = M_{\text{раз}} (Ж_m - Ж_o) / (Ж_c - Ж_o),$$

где $Ж_m$, $Ж_o$, $Ж_c$ — содержание жира в молоке, обрате и сливках соответственно, %.

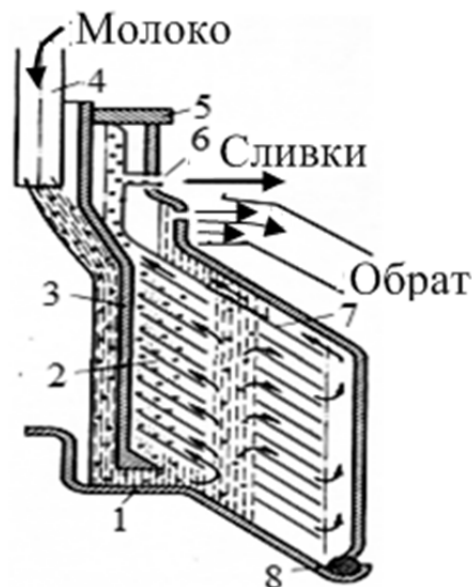
Время непрерывной работы сепаратора между разборками его барабана в целях удаления грязевых отложений рассчитывается по формуле

$$T_{\text{сеп}} = \frac{V_{\text{гр}} \rho_{\text{гр}}}{C_{\text{гр}} Q_{\text{сеп}}}.$$

Для исключения ситуаций, способствующих возникновению эпизоотий, молоко подвергают пастеризации. Процесс пастеризации характеризуется двумя параметрами: температурой молока и продолжительностью его обработки. Выделяют три режима пастеризации молока [5]:

- 1) длительный (LTLT — Low Temperature Long Time) — нагрев молока до температуры $63 \text{ }^\circ\text{C}$ с последующей выдержкой при этой температуре в течение 30 мин;
- 2) кратковременный (HTST — High Temperature Short Time) — нагрев молока до температуры $72 \dots 75 \text{ }^\circ\text{C}$ и выдержка в течение $15 \dots 20 \text{ с}$;
- 3) мгновенный — нагрев молока до температуры $85 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой до 2 с.

На молокоперерабатывающих предприятиях используют оборудование, работающее в режимах длительной или кратковременной пастеризации. Режим мгновенной пастеризации вытеснен с производства более эффективной ультрапастеризацией или ультравысокотемпе-



1 — дно; 2 — пакет тарелок; 3 — тарелкодержатель; 4 — трубка поплавковой камеры; 5 — гайка; 6 — винт регулировки жирности сливок; 7 — разделительная тарелка; 8 — уплотнитель

Рисунок 1. — Схема работы барабана сепаратора-сливоотделителя

ратурной обработкой, предусматривающей нагрев молока до температуры 135...140 °С и выдержкой в течение 2...4 с [5].

Пастеризаторы молока для телят, используемые в настоящее время на животноводческих фермах и комплексах, работают преимущественно в режиме длительной пастеризации. По конструктивному исполнению такие пастеризаторы могут быть стационарными и передвижными. Передвижные пастеризаторы, также называемые «молочные такси», представляют собой емкость, смонтированную на трех- или четырехколесном шасси. «Молочное такси» обеспечивает пастеризацию и последующее охлаждение молока, транспортирование его в животноводческое помещение и дозированную раздачу телятам при помощи насоса с питанием от аккумуляторной батареи.

Емкость установки для длительной пастеризации молока представляет собой ванну с двойными стенками из нержавеющей стали, образующими водяную рубашку нагрева или охлаждения. В процессе выполнения технологического процесса ванна заполняется молоком. Затем межстенное пространство заполняется водой до уровня переливной трубы. Вода, подогреваемая трубчатыми электронагревательными элементами, за счет теплообмена через стенки внутреннего корпуса нагревает молоко. Для обеспечения равномерного нагрева молока в ванне перемешивается мешалкой.

Тепловая мощность пастеризатора (Вт) зависит от величины поверхности его нагрева F , коэффициента теплопередачи K_T и средней логарифмической разности температур Δt_{cp} между водой в рубашке нагрева и молоком в ванне пастеризации:

$$\Theta_{\text{паст}} = FK_T \Delta t_{cp},$$

где F — площадь поверхности теплопередачи между рубашкой нагрева и ванной пастеризации, м²;

K_T — коэффициент теплопередачи, Вт / (м² · °С);

Δt_{cp} — средняя логарифмическая разность температур между водой в рубашке нагрева и молоком в ванне пастеризации, °С.

Для одного и того же пастеризатора величина тепловой мощности $\Theta_{\text{паст}}$ может варьироваться в широких пределах в зависимости от температурного режима обработки молока.

Расход электрической энергии (кВт · ч) на пастеризацию определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{паст}} = \frac{M_d c_m (t_{\text{паст}} - t_{\text{нач}})}{3,6 \cdot 10^6 \eta_{\text{паст}}},$$

где M_d — количество молока, подлежащего пастеризации, кг;

c_m — удельная теплоемкость молока, Дж / (кг · °С);

$t_{\text{паст}}$ — температура пастеризации молока, °С;

$t_{\text{нач}}$ — начальная температура молока, °С;

$\eta_{\text{паст}}$ — тепловой КПД пастеризатора.

В целях сокращения расхода энергии и уменьшения размеров пастеризационно-охлаждающей аппаратуры используют параллельное соединение нескольких пастеризаторов и регенеративные теплообменники. Наибольшее распространение в сельскохозяйственном производстве получили закрытые пластинчатые проточные теплообменники с противоточным движением нагреваемой и охлаждаемой сред.

Рабочую поверхность регенеративного теплообменного аппарата определяют по формуле

$$F_{\text{рег}} = \frac{M_d c_m E_{\text{рег}}}{t_{\text{рег}} (1 - E_{\text{рег}})},$$

где $E_{\text{рег}}$ — коэффициент регенерации;

$t_{\text{рег}}$ — температура регенерированного молока, °С.

Значение коэффициента регенерации определяется соотношением

$$E_{\text{рег}} = \frac{t_{\text{рег}} - t_{\text{нач}}}{t_{\text{паст}} - t_{\text{нач}}}.$$

В первом приближении температура регенерированного молока рассчитывается по формуле

$$t_{\text{рег}} = (1 - E_{\text{рег}})(t_{\text{паст}} - t_{\text{нач}}).$$

Поточно-технологическая линия первичной обработки молока должна отвечать следующим условиям:

– содержание механических примесей в молоке должно соответствовать I степени чистоты молока [6];

– в течение 1...2 ч после дойки молоко должно быть охлаждено до 4...6 °С.

Выбрав оборудование для поточной технологической линии первичной обработки молока, проводят энергетический расчет молочной.

Общая установленная мощность оборудования и освещения в молочной определяется следующим образом:

$$N_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{об}_i} + N_{\text{осв}},$$

где $N_{\text{об}_i}$ — установленная мощность i -го оборудования в молочной, кВт;

$N_{\text{осв}}$ — установленная мощность освещения, кВт.

Установленная мощность освещения

$$N_{\text{осв}} = q_{\text{осв}} S.$$

где $q_{\text{осв}}$ — удельная величина освещения помещения, Вт / м²;

S — площадь молочной, м²; определяется произведением площади $S_{\text{об}}$, занимаемой оборудованием, на коэффициент запаса $K_S = 3...5$.

Общий расход электроэнергии за сутки рассчитывается по формуле

$$W_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n N_{\text{об}_i} T_{\text{об}_i} + N_{\text{осв}} T_{\text{осв}},$$

где $T_{\text{об}_i}$ — продолжительность работы i -го оборудования молочной, ч;

$T_{\text{осв}}$ — продолжительность использования освещения, ч.

При рассмотрении нескольких вариантов комплектации технологической линии первичной обработки молока значение суточного расхода электрической энергии $W_{\text{общ}}$ используется в качестве вспомогательного показателя, характеризующего энергозатраты по соответствующему варианту.

Заключение. Получение положительного эффекта от сложной производственной цепи в животноводстве возможно при внедрении поточного производства. При комплектовании технологической линии первичной обработки молока следует учитывать суточный объем производства молока и режим его отправки с фермы на перерабатывающее предприятие. Главной задачей оптимизации технологической линии первичной обработки молока на ферме является подбор комплекта машин и оборудования, расположенных в порядке последовательности выполнения технологических операций с необходимой производительностью.

Список цитированных источников

1. Мишуров, Н. П. Биоэнергетическая оценка и основные направления снижения энергоемкости производства молока. — М. : Росинформагротех, 2010. — 152 с.
2. Китун, А. В. Основы формирования поточных технологических линий на животноводческой ферме / А. В. Китун, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2021. — № 2. — С. 160—164.
3. Китун, А. В. Организационно-экономическая оценка машин и машинных технологий в животноводстве и птицеводстве : учеб.-метод. пособие / А. В. Китун, И. П. Бусел, В. И. Передня. — Минск, 2008. — 123 с.
4. Современные технологии производства продукции животноводства : рекомендации / В. К. Пестис и [др.] ; под общ. ред. В. К. Пестиса, Е. А. Добрука. — Гродно : ГГАУ, 2011. — 462 с.
5. *Bylund, G. Dairy Processing Handbook.* — Lund : Tetra Pak Processing Systems, 2015. — 482 p.
6. Молоко. Метод определения чистоты : ГОСТ 8218-89. — Введ. 01.01.1990. — М. : Стандартиформ, 2009. — 5 с.

Поступила в редакцию 18.02.2022.