

УДК 637.023.001.24

<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-128-131>

Исследования / research

**Сеидов З.М.,  
Мамедов Г.Б.***Азербайджанский государственный аграрный университет, пр. Ататюрка, 450, Гянджа, Азербайджан, AZ2000***Ключевые слова:** электротепловая обработка, пастеризация молока, тепловая энергия оптимизация, молочные фермы, приведенные затраты**Для цитирования:** Сеидов З.М., Мамедов Г.Б. Оптимизация установок для электротепловой обработки молока. Аграрная наука. 2022; 359 (5): 128–131.<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-128-131>**Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи, несут равную ответственность за плагиат и представленные данные.****Авторы объявили, что нет никаких конфликтов интересов.****Seyidov Z.M.,  
Mammadov G.B.***Azerbaijan State Agrarian University, Ataturk avenue, 450, Ganja, Azerbaijan, AZ2000***Key words:** electric heat treatment, milk pasteurization, thermal energy, optimization, dairy farms, reduced costs**For citation:** Seyidov Z.M., Mammadov G.B. Optimization of installations for electrothermal processing of milk. Agrarian Science. 2022; 359 (5): 128–131. (In Russ.)<https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-359-5-128-131>**The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism and presented data.****The authors declare no conflict of interest.**

## Оптимизация установок для электротепловой обработки молока

### РЕЗЮМЕ

**Актуальность.** Тепловую обработку молока проводят при разной температуре на различном оборудовании. При охлаждении молочного сырья замедляется жизнедеятельность микроорганизмов, вызывающих порчу, и увеличивается срок хранения молока в свежем виде. Нагревание молока интенсифицирует многие технологические операции. Пастеризация молока и молочных продуктов предназначена для подавления жизнедеятельности микроорганизмов, находящихся в вегетативной форме. Стерилизация молока и молочных продуктов обеспечивает уничтожение не только вегетативных, но и споровых форм микроорганизмов, что позволяет значительно увеличить срок хранения.

**Методы.** На молочных фермах наиболее целесообразно использовать малоинерционные электротепловые установки. Сейчас известно несколько принципиальных и конструктивных схем таких установок. Однако в большинстве источников мало информации об их технико-экономической оптимизации. Задача в данной работе заключалась в нахождении экстремума целевой функции при заданных ограничениях. Ограничения учитывают технические требования, присущие данному технологическому процессу тепловой обработки молока. В целях сопоставления расчеты выполнены для вариантов с конечными значениями стоимости базовых узлов установки и оптимизации только секций электропастеризации и рекуперации теплообменного аппарата.

**Результаты.** Приведенный алгоритм без существенных изменений можно использовать для оптимизации установок с прямым нагревом или для других видов нагрева молока.

## Optimization of installations for electrothermal processing of milk

### ABSTRACT

**Relevance.** Heat treatment of milk is carried out at different temperatures on different equipment. When milk raw materials are cooled, the vital activity of microorganisms that cause spoilage slows down and the shelf life of fresh milk increases. Heating milk intensifies many technological operations. Pasteurization of milk and dairy products is designed to suppress the vital activity of microorganisms in vegetative form. Sterilization of milk and dairy products ensures the destruction of not only vegetative, but also spore forms of microorganisms, which significantly increases their shelf life.

**Methods.** On dairy farms, it is most advisable to use low-inertia electric heating installations. Now there are several basic and constructive schemes of such installations. However, in most sources there is little information about their technical and economic optimization. The task in this paper was to find the extremum of the objective function under given constraints.

**Results.** The restrictions take into account the technical requirements inherent in this technological process of heat treatment of milk. In order to compare, calculations were performed for variants with final values of the cost of the basic units of the installation and optimization of only the sections of electropasteurization and heat exchanger recovery. The above algorithm can be used without significant changes to optimize installations with direct heating or other types of milk heating.

Поступила: 4 марта 2022  
Принята к публикации: 29 апреля 2022

Received: 4 March 2022  
Accepted: 29 April 2022

Тепловую обработку молока проводят при разной температуре на различном оборудовании. При охлаждении молочного сырья замедляется жизнедеятельность микроорганизмов, вызывающих порчу, и увеличивается срок хранения молока в свежем виде.

Нагревание молока интенсифицирует многие технологические операции.

**Пастеризация молока и молочных продуктов** — уничтожение вегетативных форм микроорганизмов, находящихся в молоке (возбудителей кишечных заболеваний, бруцеллеза, туберкулеза, ящура и др.), позволяющее сохранить при этом его биологическую, питательную ценность и качество. В практике молокопроизводства основными являются три вида пастеризации:

- длительная — проводят при температуре 63–65 °C с выдержкой 30 мин.;
- кратковременная — проводят при температуре 72–75 °C с выдержкой 15–20 с;
- высокая, или моментальная — проводят при температуре 85–90 °C без последующей выдержки.

Стерилизация молока и молочных продуктов — тепловая обработка молока при температуре выше 100 °C, при этом полностью уничтожаются все виды вегетативных микроорганизмов, их споры, инактивируются ферменты. Стерилизация обеспечивает уничтожение не только вегетативных, но и споровых форм микроорганизмов, что позволяет значительно увеличить срок хранения готовых изделий. Температура стерилизации обычно находится в пределах 115–145 °C [1].

Электротепловая обработка молока на молочных фермах становится все более целесообразной, так как увеличивается количества молочных продуктов, поступающих из хозяйств непосредственно в торговую сеть. Поэтому в арсенале пастеризационно-охладительной техники появляется несколько типов электропастеризаторов [2, 3].

В существующих пастеризационных установках используют поверхностные теплообменные аппараты, в которых молоко нагревают с помощью промежуточных теплоносителей (воды и пара). Наиболее распространены пластинчатые теплообменные аппараты производительностью 1 и 3 т/ч. Эти аппараты удобны в эксплуатации при непрерывном поточном производстве и наличии котельных. Однако в фермерских хозяйствах применять их затруднительно в связи с цикличностью доения коров, обусловливающей часте промывки, запуски и установки данных устройств, а следовательно и низкий коэффициент готовности к работе. Последнее увеличивает затраты труда и расход тепловой энергии. По виду источника энергии различают паровые, электрические и комбинированные аппараты.

Для пастеризации молока применяют емкостные аппараты периодического действия, установки на базе пластинчатых и трубчатых аппаратов и комбинированное оборудование. В емкостном оборудовании в качестве теплоносителя исполь-

зуются пар и горячая вода; в зависимости от конструкции оборудование бывает с электрическим нагревом теплоносителя и без него [4]. Наибольшее применение в молочной промышленности получили пластинчатые и трубчатые аппараты. Классификация оборудования для пастеризации молока дана на рисунке 1.

В фермерских хозяйствах наиболее целесообразно использовать малоинерционные электротепловые установки [3, 4, 5]. Сейчас известно несколько принципиальных и конструктивных схем таких устройств. Однако в большинстве источников большее внимание уделено технологическо-режимным и конструктивным параметрам и недостаточно информации о технико-экономической оптимизации. Вместе с тем системный оптимизационный подход к созданию установок обеспечивает значительное снижение затрат на их производство и на электропастеризацию молока в целом.

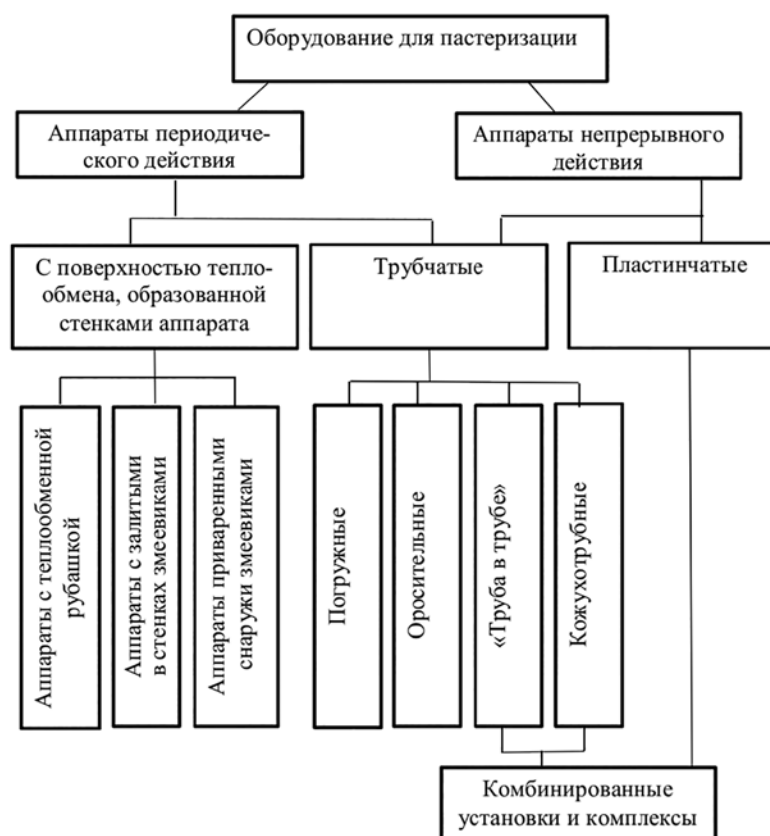
### Объект и метод исследования

Объектом исследования являются электропастеризационные поточные установки. Рассматривается возможный подход к оптимизации поточных электропастеризационных установок с поверхностным способом ввода тепловой энергии в обрабатываемое молоко [6, 7, 8]. При этом следует отметить, что прямой электронагрев молока различными способами подвода энергии (электродный, с помощью излучения, индукционным способом или с промежуточным теплоносителем) не вносит в методику оптимизации аппарата существенно новых элементов.

Оптимизация электропастеризационной установки относится к многомерным технико-экономическим задачам, в которых за целевую функцию принимают минимум приведенных затрат [8, 9]. Ограничивающие ус-

Рис. 1. Классификация оборудования для пастеризации молока

Fig. 1. Classification of milk pasteurization equipment



ловия здесь — объем производства молока и качество продукции, обусловленное температурным режимом на поверхности теплообмена.

### Результаты и обсуждение

Общее решение задачи основано на анализе уравнений приведенных затрат на установку с учетом ее надежности и ущерба от простоев:

$$Z_{пр} = \sum_{i=1}^{i=n} P_i = \Theta + E_H K = R_T + S_{\pi} + A_c + A_g + E_H(K_y + F), \quad (1)$$

где  $P_i$  —  $i$ -я составляющая приведенных затрат, AZN;  $\Theta$  и  $K$  — общие эксплуатационные (AZN в год) и капитальные (AZN) затраты на установку;  $E_H$  — нормативный коэффициент эффективности, 1/год;  $R_T$  — затраты на текущий ремонт, AZN в год;  $S_{\pi}$  — суммарный ущерб от простоев, AZN в год;  $A_c$  — амортизационные отчисления, AZN в год;  $A_g$  — затраты на электроэнергию, AZN в год;  $K_y$  — стоимость установки, AZN;  $F$  — стоимость общего запаса сменяемых деталей, AZN.

Для анализа и сопоставления различных установок используем метод относительных величин. В качестве относительного показателя удобно принять стоимость полезного расхода электроэнергии на тепловую обработку годового количества продукта (AZN в год). Выбор данного показателя обусловлен следующими причинами.

Во-первых, полезный расход энергии на обработку молока зависит только от планового объема производства и физических параметров процесса, так что его можно рассчитать с требуемой достоверностью.

Во-вторых, стоимость электроэнергии относится к вполне стабильным показателям.

В-третьих, годовой объем производства молока  $G$  на фермах определяет собой производительность и степень загрузки установки.

Преобразование уравнения (1) позволяет получить целевую функцию в относительных единицах:

$$P_o = Z_{пр} \frac{3600}{a_{уд} \cdot G \cdot S_g} = \sum_{i=1}^{i=5} P_i \frac{3600}{a_{уд} \cdot G \cdot S_g} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $a_{уд}$  — удельный полезный расход электроэнергии на нагрев молока до температуры пастеризации, кВт·ч/кг;  $G$  — годовой объем производства молока на ферме, кг/в год;  $S_g$  — стоимость электроэнергии, AZN на 1 кВт·ч.

В качестве составляющих  $P_i$  приняты затраты: на амортизацию установки

$$P_1 = n(E_H + \varepsilon_a) \left[ \frac{S_{эH}}{\mu} + S_{\delta} + r, \varepsilon_p \right]; \quad (3)$$

на оплату электроэнергии

$$P_2 = \frac{a_{уд}(1 - \varepsilon_p) \cdot (G - qnT_3)}{\eta_T \cdot 3600} \cdot S_g; \quad (4)$$

на замену источников тепловой энергии

$$P_3 = \frac{G}{qT_{HO}} \cdot S_{эH}; \quad (5)$$

на техобслуживание

$$P_4 = n \cdot n_{TO} \cdot S_{TO}; \quad (6)$$

обусловленные ущербом от простоев установки

$$P_5 = \frac{GT_3}{T_{HO}} \cdot S_y; \quad (7)$$

где  $n$  — число установок;  $\varepsilon_a$  — норма амортизационных отчислений;  $S_{эH}$  — суммарная стоимость источников тепловой энергии в установке, AZN;  $\mu$  — доля стоимости источников тепловой энергии в электропастеризаторе;  $S_{\delta}$  — стоимость базовых узлов в установке, AZN;  $r$  — стоимость рекуператора тепловой энергии (на единицу коэффициента рекуперации, AZN);  $\varepsilon_p$  — коэффициент рекуперации;  $q$  — производительность установки, кг/ч;  $T_3$  — время замены электронагревателя (источника тепловой энергии), ч;  $\eta_T$  — тепловой КПД установки;  $T_{HO}$  — наработка электронагревателя (источника тепловой энергии) на отказа (срок службы), ч;  $n_{TO}$  — число техобслуживаний в год;  $S_{TO}$  — стоимость одного техобслуживания, AZN;  $S_y$  — стоимость потерянной продукции при простое электропастеризатора, AZN на 1 кг.

Величины  $S_{эH}$ ,  $a_{уд}$ ,  $n_{TO}$ ,  $T_3$ ,  $T_{HO}$ ,  $S_y$  аппроксимируются следующими простыми функциональными зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} S_{эH} &= (S_{уд} A_{эH} + S_a) n_{эH} k_3; \\ a_{уд} &= c_m(t_k - t_H); \\ n_{TO} &= a + bW; \\ T_{HO} &= m \Delta P W^{-2}; \\ T_3 &= c + dn. \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} S_{уд} &= l + kW; \\ S_a &= \frac{WA_{эH} S_k}{U}; \\ n_{эH} &= \frac{Ga_{уд}(1 - \varepsilon_p)}{\eta_T WA_{эH}}; \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где  $S_{уд}$  и  $A_{эH}$  — стоимость 1 м<sup>2</sup> (AZN) и площадь (м<sup>2</sup>) поверхности одного электронагревателя;  $S_a$  — стоимость арматуры токопровода, AZN;  $n_{эH}$  — число источников тепловой энергии и электропастеризаторов;  $k_3$  — коэффициент запаса мощности источника тепловой энергии на разогрев установки;  $c_m$  — средняя удельная массовая теплоемкость молока, Дж/кг °C;  $t_k$  — температура пастеризации молока, °C;  $t_H$  — температура сырого молока, °C;  $W$  — поверхностная мощность источника тепловой энергии, Вт/м<sup>2</sup>;  $\Delta P$  — допустимое снижение мощности источника тепловой энергии, %;  $S_k$  — удельная стоимость арматуры токопровода к источнику тепловой энергии, AZN;  $a, b, c, d, k, l, m, z$  — постоянные коэффициенты в уравнениях функциональных связей;  $U$  — напряжение питания, Вт.

Из анализа уравнения (2) виден вклад отдельных составляющих в приведенные затраты на различные установки и пути их снижения. В частности, для аппаратного оформления установки необходимо знать оптимальные значения  $\varepsilon_p$  и  $n_{эH}$ , а для выбора источника тепловой энергии —  $W$ ,  $T_{HO}$ ,  $S_{уд}$  и коэффициенты функциональных зависимостей  $k, l, m, z$  из уравнений (8) и (9).

В целях сопоставления расчеты выполнены для вариантов с конечными значениями стоимости  $S_{\delta}$  базовых узлов установки и оптимизацией только секций электропастеризации и рекуперации теплообменного аппарата ( $S_{\delta} = 0$ ). Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд важных выводов, имеющих практическое

значение при разработке электропастеризационных установок для фермерских хозяйств.

При этом во всех вариантах коэффициент рекуперации  $\varepsilon_p$  принимает максимально допустимое значение (0,9), несмотря на высокую стоимость секции рекуперации, определяемую коэффициентом  $k$  в пределах  $\varepsilon_p = 0,8-0,9$ . Следовательно, целесообразно максимально повышать степень рекуперации тепловой энергии в электропастеризационных установках при одновременном снижении стоимости источников тепловой энергии.

Оптимальная мощность источников тепловой энергии, приходящаяся на единицу поверхности, во всех вариантах расчета остается практически неизменной (0,93–0,86 Вт/см<sup>2</sup>), снижаясь до 0,58 Вт/см<sup>2</sup> лишь в слу-

чаях, когда установки используют на небольших фермах при сроке службы  $T_{HO} \geq 10^3$  ч.

### Выводы

Из приведенной оптимизационной модели видно, что целевая функция (минимум относительных приведенных затрат) во всех вариантах существенно ниже единицы, за исключением случаев неиспользования установок на небольших фермах  $q = 10^3$  кг/ч,  $S_0 = 75$  AZN, суточный объем обрабатываемого молока  $Q = 103$  кг). Приведенный алгоритм без существенных изменений можно использовать для оптимизации установок с прямым или другим видом нагрева молока, а также в установках с промежуточным теплоносителем.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алтухов, А.И. Развитие производства зерна в стране: мифы и реальность / А.И. Алтухов // Экономика сельского хозяйства России. - 2017. - №3. - стр. 31-39.
2. Бутов, А.М. Рынок сельскохозяйственных машин. 2017 [Электронный ресурс] / А.М. Бутов. - Режим доступа: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/02/03/1163430452/Рынок%20сельскохозяйственных%20машин%202017.pdf> (дата обращения 30.11.2021).
3. Вартанова, М.Л. Перспективы цифровизации сельского хозяйства как приоритетного направления импортозамещения / М.Л. Вартанова, Е.В. Дробот // Экономические отношения. - 2018. - Т. 8. - №1. стр. 1-12.
4. Галкин, Д.Г. Инновационное развитие производства экологически чистого продовольствия: потенциал технологических платформ / Д.Г. Галкин // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. - 2018. - №2. - стр. 87-96.
5. Галкин, Д.Г. Развитие регионов агропромышленной специализации в постиндустриальной экономике: новые подходы к производству продовольствия / Д.Г. Галкин // Вестник Челябинского государственного университета. - 2017. - №10. - стр. 94-101.
6. Гриценко, Г.М. Принципы государственного регулирования цифровизации молочной отрасли / Г.М. Гриценко, М.К. Черняков, М.М. Чернякова, И.А. Чернякова // Пищевая промышленность. - 2019. - №11. - стр. 45-49.
7. Leeuwis, C. (2020). Reconceptualizing participation for sustainable rural development: Towards a negotiation approach. *Development and Change* 31 (5):931–959.
8. Lundy, M., Gottret, M. V. and Ashby, J. (2019). Learning alliances: An approach for building multi-stakeholder innovation systems. In *ILAC Brief 8Rome: Bioversity*.
9. Madzudzo, E. (2018). Role of brokerage in evolving innovation systems: A case of the fodder innovation project in Nigeria. *The Journal of Agricultural Education and Extension* 17 (2018):195–210.
10. [https://itexn.com/10471\\_oborudovanie-dlja-teplovoy-obrabotki-moloka-i-molochnyh-produktov.html](https://itexn.com/10471_oborudovanie-dlja-teplovoy-obrabotki-moloka-i-molochnyh-produktov.html).
11. [https://itexn.com/10471\\_oborudovanie-dlja-teplovoy-obrabotki-moloka-i-molochnyh-produktov.html](https://itexn.com/10471_oborudovanie-dlja-teplovoy-obrabotki-moloka-i-molochnyh-produktov.html).

### ОБ АВТОРАХ:

**Зухраб Сейидов**, докторант кафедры информационных технологий Азербайджанского государственного аграрного университета  
ORCID: 0000-0003-2603-7058  
**Габиль Мамедов**, доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственной техники Азербайджанского государственного аграрного университета  
ORCID: 0000-0001-7003-5995

### REFERENCES

1. Altukhov, A.I. Development of grain production in the country: myths and reality / A.I. Altukhov // *The economics of agriculture in Russia*. - 2017. - No.3. - pp. 31-39. (in Russ.).
2. Butov, A.M. Agricultural machinery market. 2017 [Electronic resource] / A.M. Butov. - Access mode: <https://dcenter.hse.ru/data/2018/02/03/1163430452/Market%20agricultural%20machines%202017.pdf> (accessed 30.11.2019). (in Russ.).
3. Vartanova, M.L. Prospects of digitalization of agriculture as a priority area of import substitution / M.L. Vartanova, E.V. Drobot // *Economic relations*. - 2018. - Vol. 8. - No. 1. pp. 1-12. (in Russ.).
4. Galkin, D.G. Innovative development of environmentally friendly food production: the potential of technological platforms / D.G. Galkin // *Bulletin of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*. - 2018. - No.2. - pp. 87-96. (in Russ.).
5. Galkin, D.G. Development of regions of agro-industrial specialization in the post-industrial economy: new approaches to food production / D.G. Galkin // *Bulletin of the Chelyabinsk State University*. - 2017. - No. 10. - pp. 94-101. (in Russ.).
6. Gritsenko, G.M. Principles of state regulation of digitalization of the dairy industry / G.M. Gritsenko, M.K. Chernyakov, M.M. Chernyakova, I.A. Chernyakova // *Food industry*. - 2019. - No.11. - pp. 45-49. (in Russ.).
7. Leeuwis, C. (2020). Reconceptualizing participation for sustainable rural development: Towards a negotiation approach. *Development and Change* 31 (5):931–959.
8. Lundy, M., Gottret, M. V. and Ashby, J. (2019). Learning alliances: An approach for building multi-stakeholder innovation systems. In *ILAC Brief 8Rome: Bioversity*.
9. Madzudzo, E. (2018). Role of brokerage in evolving innovation systems: A case of the fodder innovation project in Nigeria. *The Journal of Agricultural Education and Extension* 17 (2018):195–210.
10. [https://itexn.com/10471\\_oborudovanie-dlja-teplovoy-obrabotki-moloka-i-molochnyh-produktov.html](https://itexn.com/10471_oborudovanie-dlja-teplovoy-obrabotki-moloka-i-molochnyh-produktov.html).
11. [https://itexn.com/10471\\_oborudovanie-dlja-teplovoy-obrabotki-moloka-i-molochnyh-produktov.html](https://itexn.com/10471_oborudovanie-dlja-teplovoy-obrabotki-moloka-i-molochnyh-produktov.html).

### ABOUT THE AUTHORS:

**Zohrab Seyidov**, PhD doctoral student of the Department of Information Technology of the Azerbaijan State Agrarian University  
ORCID: 0000-0003-2603-7058  
**Gabil Mammadov**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Agricultural Machinery of the Azerbaijan State Agrarian University  
ORCID: 0000-0001-7003-5995