

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>
<https://elibrary.ru/SBXYHE>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Энергетическая и эксергетическая оценка электротехнологических средств термической обработки молока



А. А. Багаев*^{ORCID}, С. О. Бобровский^{ORCID}

Алтайский государственный аграрный университет^{ORCID}, Барнаул, Россия

Поступила в редакцию: 28.11.2022

Принята после рецензирования: 13.01.2023

Принята к публикации: 07.02.2023

*А. А. Багаев: BAGAEV710@mail.ru,

<https://orcid.org/0000-0003-2586-2590>

С. О. Бобровский: <https://orcid.org/0000-0001-9243-0179>

© А. А. Багаев, С. О. Бобровский, 2023



Аннотация.

Поиск и обоснование перспективных направлений повышения энергоэффективности технологических процессов пастеризации молока является актуальной научно-технической проблемой. Целью настоящей работы являлось получение сравнительной оценки эффективности технологий и технических устройств пастеризации молока с использованием электротехнологических средств.

Объектом исследования являлся процесс нагрева молока от 20 до 75 °С производительностью 1000 кг/ч при расчетной мощности 58,95 кВт в разных устройствах термической обработки молока: пастеризатор «водяной пар – молоко» с использованием электротехнологических средств нагрева, пастеризатор индукционного типа и термосифонный пастеризатор с использованием прямого или косвенного электронагрева. Использовали методы энергетического и эксергетического анализа.

Система «пастеризатор молока “водяной пар – молоко” с использованием электрического косвенного (с помощью элементного, индукционного) или прямого (электродного) нагрева» характеризуется следующими показателями: потери эксергии – 1,29 кВт, потребляемая мощность – 71,29 кВт, эксергетический КПД – 0,99, энергетический КПД – 0,827. Для системы «термосифонный пастеризатор с использованием прямого или косвенного электронагрева» характерны: потери эксергии – 1,29 кВт, потребляемая мощность – 60,92 кВт, эксергетический КПД – 0,99, энергетический КПД – 0,9676. Наименее конкурентоспособными параметрами обладает пастеризатор индукционного типа: потери эксергии – 10,8 кВт, потребляемая мощность – 70,43 кВт, эксергетический КПД – 0,867, энергетический КПД – 0,837.

Для повышения энергоэффективности процесса пастеризации молока целесообразно использовать систему «пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева». Перспективным направлением дальнейших исследований следует считать совершенствование системы типа «пастеризатор индукционного типа».

Ключевые слова. Пастеризация, молочные продукты, эксергетическая эффективность, энергетическая эффективность, электротехнология, прямой нагрев, косвенный нагрев, индукционный нагрев, термодинамические свойства

Для цитирования: Багаев А. А., Бобровский С. О. Энергетическая и эксергетическая оценка электротехнологических средств термической обработки молока // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 2. С. 272–280. (На англ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>

Electrotechnological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency



Andrei A. Bagaev*^{ORCID}, Sergey O. Bobrovskiy^{ORCID}

Altai State Agricultural University^{ORCID}, Barnaul, Russia

Received: 28.11.2022
Revised: 13.01.2023
Accepted: 07.02.2023

*Andrei A. Bagaev: BAGAEV710@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0003-2586-2590>
Sergey O. Bobrovskiy: <https://orcid.org/0000-0001-9243-0179>

© A.A. Bagaev, S.O. Bobrovskiy, 2023



Abstract.

The dairy industry needs new and more energy-efficient technological procedure for milk pasteurization. This article introduces a comparative efficiency assessment of various milk pasteurization technologies and electrotechnological means.

The study featured milk, which was heated from 20 to 75°C with a capacity of 1000 kg/h at an estimated power of 58.95 kW. The treatment involved a steam-to-milk pasteurizer with electric indirect or direct heating, an induction pasteurizer, and a thermosiphon pasteurizer with direct or indirect electric heating. The study relied on the methods of energy and exergy analyses. The system of steam-to-milk pasteurizer with electric indirect (elemental, induction) or direct (electrode) heating demonstrated the following indicators: exergy loss – 1.29 kW, power consumption – 71.29 kW, exergy efficiency – 0.99, energy efficiency – 0.827. The thermosiphon pasteurizer with direct or indirect electric heating demonstrated the following properties: exergy loss – 1.29 kW, power consumption – 60.92 kW, exergy efficiency – 0.99, energy efficiency – 0.9676. The induction pasteurizer had the least competitive parameters: exergy loss – 10.8 kW, power consumption – 70.43 kW, exergy efficiency – 0.867, energy efficiency – 0.837.

The thermosiphon pasteurizer with direct or indirect electric heating was able to increase the energy efficiency of milk pasteurization, while the induction pasteurizer proved to be a promising R&D direction.

Keywords. Pasteurization, dairy products, exergy efficiency, energy efficiency, electrotechnology, direct heating, indirect heating, induction heating, thermodynamic properties

For citation: Bagaev AA, Bobrovskiy SO. Electrotechnological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(2):272–280. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>

Введение

Современные тенденции развития характеризуются увеличением мощности предприятий и сокращением их количества, что сопровождается повышением времени доставки сырья из хозяйств-производителей и появлением недостатков современных технологий охлаждения полученного в хозяйстве молока.

Основной задачей первичной обработки молочного сырья является уничтожение как патогенных микроорганизмов (кишечная палочка, возбудители брюшного тифа и туберкулеза), так и ферментных систем, одной из которых является фосфатаза, отсутствие которой свидетельствует о достаточной обеззараженности молока [1]. Указанные патогены не образуют в молоке спор.

Наибольшее распространение получил тип пастеризатора, в котором промежуточным теплоносителем выступает вода или влажный водяной

пар той или иной степени насыщения [2, 3]. Процесс нагрева воды и получения водяного пара носит неспецифический характер и может быть обеспечен такими электротехнологическими средствами, как косвенный (элементный, индукционный) или прямой (электродный) нагрев.

Известны методы антибактериальной обработки молока и молочных продуктов, отличающиеся от тепловых. К ним относятся ультразвук, инфракрасное и ультрафиолетовое облучение, энергия солнца, СВЧ токи, гидродинамические и другие методы обработки [4–13]. Эти технологии не вышли за рамки научно-исследовательских работ и не получили широкого распространения.

Единственной технологией, обеспечивающей гарантированное качество молока и молочных продуктов по содержанию патогенных микроорганизмов и ферментных систем, является термическая обработка. На уничтожение патогенных

микроорганизмов и ферментных систем в молоке влияет совокупность температуры и времени воздействия. Основные виды тепловой обработки, применяемые в молочном производстве, с описанием температурных режимов и времени нагрева представлены в [1]. Из перечня основных видов тепловой обработки для исследования выбрана т. н. «высокотемпературная кратковременная пастеризация», осуществляемая при температуре 72–75 °С в течение 15–20 с.

Перспективной технологией термической обработки пищевых продуктов считается индукционный нагрев. Для указанной технологии декларируется энергетическая эффективность в пределах от 95 до 99 %, объективность оценки которой требует подтверждения [14–18].

Проведенный анализ показывает, что количество известных и перспективных технологий пастеризации молока велико. В связи с этим возникает актуальная потребность в определении объективных методов оценки их энергоэффективности и установлении направлений ее повышения.

В соответствии с современной тенденцией развития подходов к анализу эффективности систем и технологических процессов, наряду с энергетическим коэффициентом полезного действия (КПД), все большее распространение получает эксергетический КПД [19]. Эксергетическая эффективность основана на 2 законе термодинамики. В этом случае термодинамический анализ системы предусматривает решение системы уравнений, в состав которой входят уравнения баланса массы, энергии, энтропии и эксергии [20]. Для достижения поставленной цели исследования целесообразно ограничиться балансовыми уравнениями энергии и эксергии.

Процессы нагрева относятся к необратимым. Для необратимых систем первый и второй законы термодинамики можно представить в виде четырех несводимых друг к другу характеристических термодинамических функций, одной из которых является энергия Гиббса (изобарно-изотермический потенциал) $G = h - T \times S$, где G – энергия Гиббса, h – энтальпия, T – температура, S – энтропия.

В работах [20, 21] основой определения удельной эксергии ψ является уравнение Гиббса:

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (S - S_0) \quad (1)$$

где h_0, S_0 – энтальпия и энтропия начального состояния веществ (база для сравнения) при начальной температуре T_0 и начальном давлении P_0 .

Эксергия системы [20]:

$$E_x = m \times \psi = m \times [(h - h_0) - T_0 (S - S_0)] \quad (2)$$

Общий баланс эксергии оценивается следующим образом [20]:

$$\Delta E_x = \sum E_x^{BX} - \sum E_x^{BbIX} \quad (3)$$

где $\sum E_x^{BX}$ – сумма эксергий на входе в элементы системы; $\sum E_x^{BbIX}$ – сумма эксергий на выходе из элементов системы или общая выработка эксергии.

Эксергетическая эффективность представляет собой отношение эксергии на выходе (общей выработке эксергии) к эксергии на входе (общей потребляемой энергии). Тогда эксергетический КПД, %:

$$\eta_{\text{ЭКС}} = \frac{\sum E_x^{BbIX}}{\sum E_x^{BX}} \times 100 = \left(1 - \frac{\Delta E_x}{\sum E_x^{BX}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Условием повышения эффективности сравниваемых процессов или систем является увеличение эксергетического КПД $\eta_{\text{ЭКС}}$.

Энергетическая эффективность основана на 1 законе термодинамики. В качестве наиболее простой и распространенной оценки энергетической эффективности процесса принят коэффициент полезного действия КПД $\eta_{\text{ЭН}}$, представляющий собой отношение требуемой полезной мощности на нагрев молока $P_{\text{пол}}$ к затраченной мощности электротехнологической установкой $P_{\text{эту}}$, %:

$$\eta_{\text{ЭН}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{эту}}} \times 100 \quad (5)$$

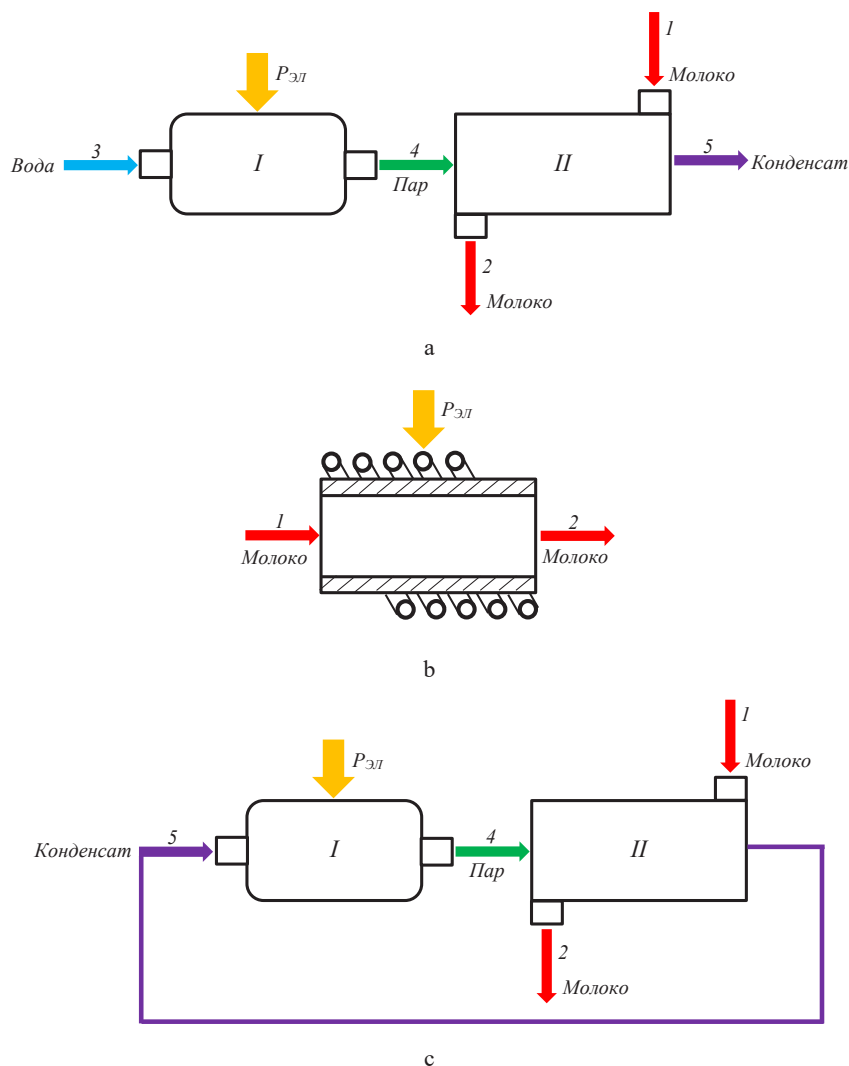
Условием повышения эффективности является превышение энергетического КПД того или иного процесса или системы.

Целью работы являлось получение сравнительной оценки эффективности технологий и технических устройств с использованием электротехнологических средств на основе энергетического и эксергетического анализа.

Объекты и методы исследования

Для достижения поставленной цели использовали методы энергетического и эксергетического анализа.

Объектом исследования являлись эксергетические и энергетические процессы, основанные на первом и втором законах термодинамики, в электротехнологических устройствах термической обработки пищевых жидкостей: пастеризатор молока типа «водяной пар – молоко» с использованием электрического косвенного (с помощью ТЭНов, индукционного) или прямого нагрева (электродного) (рис. 1а), пастеризатор индукционного типа (рис. 1б) и пастеризатор термосифонного типа с использованием одного из перечисленных выше способов (рис. 1с).



I – генератор водяного пара с использованием электрического косвенного (с помощью ТЭНов, индукционного) или прямого (электродного) нагрева, *II* – теплообменник

Рисунок 1. Схемы систем пастеризации молока: а – пастеризатор молока типа «водяной пар – молоко»; б – пастеризатор индукционного типа; с – пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева

Figure 1. Milk pasteurization systems: a – a steam-to-milk pasteurizer; b – an induction pasteurizer; c – a thermosiphon pasteurizer with direct/indirect electric heating

Корректность проведенного анализа энергетической и энергетической эффективности рассматриваемых электротехнологических средств нагрева молока обусловлена общностью исходных данных, изложенных в работе [22], в которой проанализированы и определены гидро- и термодинамические характеристики теплообменников для нагрева пищевых продуктов, в частности молока: производительность по молоку $G = 1000 \text{ кг/ч} = 0,27 \text{ кг/с} = 0,96 \text{ м}^3/\text{ч}$, температура стенки нагревательной трубы $T_{CT} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, температура молока на входе $T_{BX} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, температура молока на выходе $T_{ВЫХ} = 75 \text{ }^\circ\text{C}$.

В этом случае полезный тепловой поток, кВт, с учетом удельной теплоемкости молока $c = 3,97 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град)}$ и мощность электротермической установки составляют:

$$P_{\text{пол}} = Q = Gc \times (T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}) = 58,95 \quad (6)$$

Принятая температура стенки теплообменной поверхности $T_{CT} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ограничена требованиями обеспечения термоустойчивости, характеризующими свойство молочного сырья выдерживать температурную обработку без коагуляции белков (денатурации) и наличие термолабильных белков в молоке [23].

Предметом исследования являлась зависимость коэффициентов эксергетической и энергетической эффективности электротехнологических средств нагрева молока, таких как пастеризатор молока типа «водяной пар – молоко» с использованием электрического косвенного или прямого нагрева, пастеризатор индукционного типа и пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева, при заданных производительности по молоку и геометрии теплообменника.

В процессе исследования приняты следующие допущения:

- не учитываются теплотери в окружающую среду;
- режим работы считается стационарным установившемся;
- не учитываются перепады давления в теплообменниках и трубопроводах;
- пренебрегается кинетической, потенциальной и химической энергиями.

Результаты и их обсуждение

Известны такие термодинамические свойства воды и водяного пара, как энтальпия, энтропия, удельная теплота парообразования и другие.

Учтено, что энтальпия вещества h представляет собой произведение удельной теплоемкости c и температуры T : $h = cT$.

Пастеризатор молока типа «водяной пар – молоко» с использованием электрического косвенного (с помощью элементного, индукционного) или прямого (электродного) нагрева состоит из генератора пара, источником энергии которого может рассматриваться электродный, элементный или индукционный нагреватель (рис. 1а).

Температуры пара t_{II} , °С, при рабочем давлении $P_{II} = 0,13 - 0,15$ МПа:

$$t_{II}^{0,13} = 107,02$$

$$t_{II}^{0,15} = 120$$

Средняя температура пара t_{CP} , °С:

$$t_{CP} = \frac{t_{II}^{0,13} + t_{II}^{0,15}}{2} = 110 \quad (7)$$

Расход греющего пара m_{II} , кг/с, с учетом выражения (6):

$$m_{II} = \frac{Q}{(h_{II} - h_K)} = 0,0273 \quad (8)$$

где Q – полезный тепловой поток и мощность электротермической установки, кВт; h_{II} – энтальпия пара, $h_{II} = 2117912$ Дж/кг; h_K – энтальпия конденсата, $h_K = 461696,1$ Дж/кг.

Таким образом, для обеспечения производительности по молоку $G = 1000$ кг/ч = $0,27$ кг/с при его нагреве от $T_{BX} = 20$ °С на входе до $T_{ВЫХ} = 75$ °С на выходе требуется расход пара $m_{II} = 0,0273$ кг/с в соответствии с первым законом термодинамики.

Полученный водяной пар, конденсируясь на теплообменной поверхности труб или плоскостях теплообменника, передает теплоту нагреваемой среде. На вход парогенератора поступает вода из внешнего источника.

Расчет эксергетических параметров процесса проведен с использованием термодинамических параметров воды, пара, конденсата и молока с использованием формул (1) и (2). Результаты расчета сведены в таблице 1.

Затраты электрической энергии на получение пара $P_{эл}$, кВт, определяются с помощью данных таблицы 1:

$$P_{эл} = m_{II} \times (h_5 - h_4) = 0,0273 \times (2693,3 - 83,93) = 71,29 \quad (9)$$

Данные таблицы 1 позволяют, в соответствии со схемой на рисунке 1а, определить сумму эксергий на входе в элементы системы E_X^{BX} , кВт (индексы

Таблица 1. Термодинамические свойства жидкостей и результаты расчета показателей эксергии в системе «пастеризатор молока типа “водяной пар – молоко” с использованием электрического косвенного (с помощью элементного, индукционного) или прямого (электродного) нагрева»

Table 1. Thermodynamic properties of liquids and calculated exergy indicators in the steam-to-milk pasteurizer with electric indirect (tubular electric heaters, induction) or direct (electrode) heating

п/п	Среда	$T, \frac{K}{C}$	$h, \frac{kJ}{kg}$	$S, \frac{kJ}{kg \times K}$	$m, \frac{kg}{c}$	$\psi = h - h_0, \frac{kJ}{kg}$	$E_X = m \times \psi, \text{ кВт}$
0	Вода	283/10	42,07	0,150	0,0273	–	–
0'	Молоко	283/10	38,80	3,880	0,2700	–	–
1	Молоко	293/20	78,80	3,940	0,2700	40,00	10,80
2	Молоко	348/75	299,63	3,995	0,2700	260,85	70,43
4	Вода	293/20	83,96	0,296	0,0273	41,89	1,14
5	Пар	383/110	2693,30	7,244	0,0273	2651,23	72,38
6	Конденсат	383/110	461,69	1,419	0,0273	419,62	11,45

Таблица 2. Термодинамические свойства жидкостей и результаты расчета показателей эксергии в системе «пастеризатор индукционного типа»

Table 2. Thermodynamic properties of liquids and calculated exergy indicators in the induction pasteurizer

п/п	Среда	$T, \frac{K}{^{\circ}C}$	$h, \frac{kJ}{kg}$	$S, \frac{kJ}{kg \times K}$	$m, \frac{kg}{c}$	$\psi = h - h_0, \frac{kJ}{kg}$	$E_x = m \times \psi, \text{ кВт}$
0	Вода	283/10	42,07	0,150	0,0273	–	–
0'	Молоко	283/10	38,80	3,880	0,2700	–	–
1	Молоко	293/20	78,80	3,940	0,2700	40,00	10,80
2	Молоко	348/75	299,63	3,995	0,2700	260,85	70,43

у составляющих эксергий соответствуют нумерации в таблице)

$$E_x^{BX} = P_{эл} + E_{x4} + E_{x5} + E_{x1} = 155,55 \quad (10)$$

и на выходе $\sum E_x^{BbIX}$, кВт

$$\sum E_x^{BbIX} = E_{x5} + E_{x6} + E_{x2} = 154,26 \quad (11)$$

В соответствии с выражением (4) потеря эксергии ΔE_x , кВт, составляет

$$\Delta E_x = \sum E_x^{BX} - \sum E_x^{BbIX} = 1,29 \quad (12)$$

Тогда эксергетический КПД, %:

$$\eta_{экс} = \frac{\sum E_x^{BbIX}}{\sum E_x^{BX}} \times 100 = \left(1 - \frac{\Delta E_x}{\sum E_x^{BX}}\right) \times 100 = 99 \quad (13)$$

Энергетический КПД, %:

$$\eta_{эн} = \frac{P_{пол}}{P_{эту}} \times 100 = \frac{58,95}{71,29} \times 100 = 82,7 \quad (14)$$

Схема пастеризатора индукционного типа изображена на рисунке 1в. Основы индукционного нагрева ферромагнетиков, инженерные методики выбора частоты электромагнитного поля, расчета индукторов и загрузок различной геометрической формы и времени нагрева известны и не имеют отношения к индукционным средствам нагрева пищевых продуктов. Использованию индукционного нагрева в пищевой промышленности посвящено небольшое количество публикаций, в которых отмечают как достоинства, так и недостатки рассматриваемой технологии [14–18].

Используя данные таблицы 1, энергия, затрачиваемая на нагрев молока $P_{эл}$, кВт, определяется следующим образом:

$$P_{эл} = G \times (h_2 - h_0) = 0,0273 \times (299,65 - 38,8) = 70,43 \quad (15)$$

Суммы эксергий на входе в элементы системы E_x^{BX} , кВт (индексы у составляющих эксергий соответствуют нумерации в таблице 1)

$$E_x^{BX} = P_{эл} + E_{x1} = 81,23 \quad (16)$$

и на выходе $\sum E_x^{BbIX}$, кВт

$$\sum E_x^{BbIX} = E_{x2} = 70,43 \quad (17)$$

Результаты расчета представлены в таблице 2.

В соответствии с выражением (4) потеря эксергии ΔE_x , кВт, составляет

$$\Delta E_x = \sum E_x^{BX} - \sum E_x^{BbIX} = 10,8 \quad (18)$$

Эксергетический КПД, %:

$$\eta_{экс} = \frac{\sum E_x^{BbIX}}{\sum E_x^{BX}} \times 100 = \left(1 - \frac{\Delta E_x}{\sum E_x^{BX}}\right) \times 100 = 86,7 \quad (19)$$

Энергетический КПД, %:

$$\eta_{эн} = \frac{P_{пол}}{P_{эту}} \times 100 = \frac{58,95}{70,43} \times 100 = 83,7 \quad (20)$$

Схема пастеризатора термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева показана на рисунке 1с. Термосифон состоит из испарителя, заполненного некоторым количеством промежуточного теплоносителя (например, водой), который в результате внешнего теплового воздействия (электродного, элементного или индукционного нагрева) подвергается фазовому превращению в водяной пар, который, конденсируясь на теплообменной поверхности в результате процесса теплопередачи через теплопередающую поверхность, передает тепловую энергию нагреваемому веществу. Температура конденсата равна температуре водяного пара с энтальпией меньшего значения. Термосифон обладает высокой эффективной теплопроводностью.

Используя данные таблицы 1, энергия, затрачиваемая на нагрев молока $P_{эл}$, кВт, определяется следующим образом:

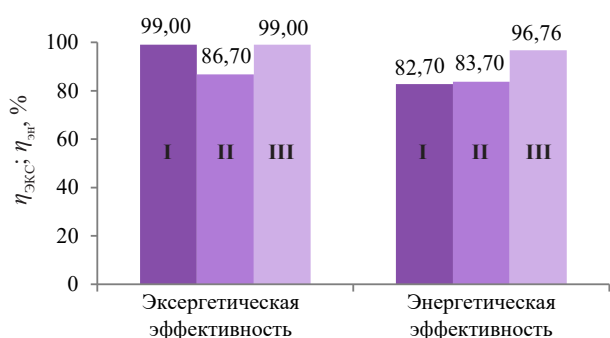
$$P_{эл} = m_l \times (h_5 - h_6) = 0,0273 \times (2693,3 - 461,69) = 60,92 \quad (21)$$

Данные таблицы 1 позволяют, в соответствии со схемой на рисунке 1а, определить сумму эксергий на входе в элементы системы E_x^{BX} ,

Таблица 3. Термодинамические свойства жидкостей и результаты расчета показателей эксергии в системе «пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева»

Table 3. Thermodynamic properties of liquids and calculated exergy indicators in the thermosiphon pasteurizer with direct or indirect electric heating

п/п	Среда	$T, \frac{K}{^{\circ}C}$	$h, \frac{kJ}{kg}$	$S, \frac{kJ}{kg \times K}$	$m, \frac{kg}{c}$	$\psi = h - h_0, \frac{kJ}{kg}$	$E_x = m \times \psi, \text{ кВт}$
0	Вода	283/10	42,07	0,150	0,0273	–	–
0'	Молоко	283/10	38,80	3,880	0,2700	–	–
1	Молоко	293/20	78,80	3,940	0,2700	40,00	10,80
2	Молоко	348/75	299,63	3,995	0,2700	260,85	70,43
4	Вода	293/20	83,96	0,296	0,0273	41,89	1,14
5	Пар	383/110	2693,30	7,244	0,0273	2651,23	72,38
6	Конденсат	383/110	461,69	1,419	0,0273	419,62	11,45



I – пастеризатор молока типа «водяной пар – молоко» с использованием электрического косвенного электрического прямого или косвенного нагрева; II – пастеризатор индукционного типа; III – пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева

Рисунок 2. Эксергетическая и энергетическая эффективность, %

Figure 2. Exergy and energy efficiency, %

кВт (индексы у составляющих эксергий соответствуют нумерации в таблице)

$$E_x^{BX} = P_{эл} + E_{x6} + E_{x5} + E_{x1} = 155,55 \quad (22)$$

и на выходе $\sum E_x^{BBX}$, кВт

$$\sum E_x^{BBX} = E_{x5} + E_{x6} + E_{x2} = 154,26 \quad (23)$$

Результаты расчетов сведены в таблице 3.

В соответствии с выражением (4) потери эксергии ΔE_x , кВт, составляют

$$\Delta E_x = \sum E_x^{BX} - \sum E_x^{BBX} = 1,29 \quad (24)$$

Особенностью данной технологии нагрева является то, что в установившемся режиме энергия затрачивается не на нагрев воды с температурой 20 °С из источника, а на нагрев конденсата, имею-

щего температуру пара 110 °С. Это сопровождается повышением энергоэффективности процесса.

Тогда эксергетический КПД, %:

$$\eta_{экс} = \frac{\sum E_x^{BBX}}{\sum E_x^{BX}} \times 100 = \left(1 - \frac{\Delta E_x}{\sum E_x^{BX}} \right) \times 100 = 99 \quad (25)$$

Энергетический КПД, %:

$$\eta_{эн} = \frac{P_{пол}}{P_{эту}} \times 100 = \frac{58,95}{60,92} \times 100 = 96,76 \quad (26)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 4 и на рисунке 2.

Анализ полученных данных показывает, что эксергетическая эффективность систем «пастеризатор молока типа “водяной пар – молоко” с использованием электрического косвенного (с помощью элементного, индукционного) или прямого (электродного) нагрева» (I) и «пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева» (III) является равноценной. Эксергетическая эффективность пастеризатора индукционного типа (II) представлена меньшим значением.

Наибольшей энергетической и эксергетической эффективностью характеризуется пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева (III).

Особенностью данной технологии нагрева является то, что в установившемся режиме энергия затрачивается не на нагрев воды с температурой 20 °С из источника с последующим ее фазовым превращением в пар, а на нагрев конденсата, имеющего температуру пара 110 °С. Это сопровождается повышением энергоэффективности процесса.

Выводы

В результате проведенного анализа установлено, что система «пастеризатор молока “водяной пар – молоко” с использованием электрического косвенного (с помощью элементного, индукционного) или прямого (электродного) нагрева» характеризуется следующими показателями: потери эксергии – 1,29 кВт,

Таблица 4. Результаты расчета эксергетических и энергетических характеристик систем пастеризации молока

Table 4. Calculated exergy and energy characteristics of milk pasteurization systems

	E_x^{BX} , кВт	E_x^{BBX} , кВт	ΔE_x , кВт	$P_{пол}$, кВт	$\eta_{экс}$	$\eta_{эн}$
I	155,55	154,26	1,29	58,95	0,990	0,8270
II	81,23	70,43	10,80	58,95	0,867	0,8370
III	155,55	154,26	1,29	58,95	0,990	0,9676

I – пастеризатор молока типа «водяной пар – молоко» с использованием электрического косвенного (с помощью элементного, индукционного) или прямого (электродного) нагрева; II – пастеризатор индукционного типа; III – пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева.

I – a steam-to-milk pasteurizer with electric indirect (tubular electric heaters, induction) or direct (electrode) heating; II – an induction pasteurizer; III – a thermosiphon pasteurizer with direct or indirect electric heating.

потребляемая мощность – 71,29 кВт, эксергетический КПД – 0,99, энергетический КПД – 0,827.

Для системы «термосифонный пастеризатор с использованием прямого или косвенного электронагрева» характерны: потери эксергии – 1,29 кВт, потребляемая мощность – 60,92 кВт, эксергетический КПД – 0,99, энергетический КПД – 0,9676.

Полученные результаты имеют практическую значимость и позволяют утверждать, что наибольшей энергоэффективностью с точки зрения энергетического и эксергетического анализа обладает система «пастеризатор термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева», преимущество которой обусловлено замкнутым циклом парообразования, при котором в пар превращается конденсат, имеющий температуру пара.

Наименее конкурентоспособными параметрами обладает пастеризатор индукционного типа: потери эксергии – 10,8 кВт, потребляемая мощность – 70,43 кВт, эксергетический КПД – 0,867, энергетический КПД – 0,837.

Результаты проведенного эксергетического анализа свидетельствуют о том, что потенциал дальнейшего совершенствования систем типа «пастеризатор молока “водяной пар – молоко” с использованием электрического косвенного (с помощью элементного, индукционного) или прямого (электродного) нагрева» и «термосифонный пастеризатор с использованием прямого или косвенного электронагрева» исчерпан. С другой стороны, открываются перспективы для дальнейшего совершенствования систем типа «пастеризатор индукционного типа».

Критерии авторства

А. А. Багаев – разработал концепцию и предложил методику исследования, сформулировал цель, выводы и перспективы исследования, провел анализ аналитических данных, осуществлял научное руководство, участвовал в подготовке 2/3 аналитической части исследования, редактировал статью до ее подачи в редакцию. С. О. Бобровский – провел обзор литературных источников по исследуемой проблеме, участвовал в подготовке 1/3 аналитической части исследования, участвовал в редактировании статьи до ее подачи в редакцию.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

A.A. Bagaev developed the research concept and methodology, set up the goal, formulated the conclusions and prospects, analyzed the data, provided scientific counselling, performed 2/3 of the analytical research, and proofread the manuscript S.O. Bobrovskiy reviewed the literary sources, performed 1/3 of the analytical research, and proofread the article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

References/Список литературы

1. Heat exchangers [Internet]. [cited 03 Oct 2022]. Available from: <https://pro-machine.ru/teploobmenniki>
2. Tay TT, Chua YL. High temperature short time (HTST) camel milk pasteurization pilot plant. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(15):6241–6245.
3. Gana IM, Gbabo A. Design of mini plant for soya milk production and pasteurization. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2017;19(4):45–53.

4. Mahmoud MZ, Davidson R, Abdelbasset WK, Fagiry MA. The new achievements in ultrasonic processing of milk and dairy products. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2022;15(1):199–205. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2022.03.005>
5. Antipov ST, Zhuchkov AV, Ovsyannikov VYu, Babenko MS. Mathematical modeling of infrared milk pasteurization. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2013;58(4):67–72. (In Russ.). [Математическое моделирование процесса инфракрасной пастеризации молока / С. Т. Антипов [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. Т. 58. № 4. С. 67–72.]. <https://www.elibrary.ru/RTUHAB>
6. Ansari JA, Ismail M, Farid M. Extension of shelf life of pasteurized trim milk using ultraviolet treatment. *Journal of Food Safety*. 2020;40(2). <https://doi.org/10.1111/jfs.12768>
7. Setiawan B, Wakidah RN, Yulianto Y. Reflective array solar water heater for milk pasteurization. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. 2020;76(4):131–137. <https://doi.org/10.5755/j01.arem.76.4.24411>
8. Tigabe S, Bekele A, Pandey V. Performance analysis of the milk pasteurization process using a flat plate solar collector. *Journal of Engineering*. 2022;2022. <https://doi.org/10.1155/2022/6214470>
9. Al-Hilphy ARS, Ali HI. Milk flash pasteurization by the microwave and study its chemical, microbiological and thermo physical characteristics. *Journal of Food Processing and Technology*. 2013;4(7).
10. Roy J, Latif UI, Mujnibeen MSA, Kabir MS, Islam MI, Alam KS. Effect of microwave heat treatment on the quality of milk. *International Journal of Recent Scientific Research*. 2017;8(9):19766–19771.
11. Al-Hilphy ARS. Designing and manufacturing of a non thermal milk pasteurizer using electrical field. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*. 2013;8(3):204–211. <https://doi.org/10.3844/ajabssp.2013.204.211>
12. Shabbir MA, Ahmed H, Maan AA, Rehman A, Afraz MT, Iqbal MW, *et al.* Effect of non-thermal processing techniques on pathogenic and spoilage microorganisms of milk and milk products. *Food Science and Technology*. 2021;41(2):279–294. <https://doi.org/10.1590/fst.05820>
13. Riazantseva KA, Sherstneva NE. Traditional and innovative uses of ultraviolet treatment in the dairy industry. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(2):390–406. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>
14. Başaran A, Yılmaz T, Çivi C. Energy and exergy analysis of induction-assisted batch processing in food production: a case study – strawberry jam production. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020;140:1871–1882. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08931-0>
15. Başaran A, Yılmaz T, Azgın ŞT, Çivi C. Comparison of drinking milk production with conventional and novel inductive heating in pasteurization in terms of energetic, exergetic, economic and environmental aspects. *Journal of Cleaner Production*. 2021;317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128280>
16. Razak ARA, Ibrahim NM, Rahman ASF, Fayzul M, Azizan MM, Hashim U, *et al.* Induction heating as cleaner alternative approach in food processing industry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1878. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012053>
17. Wu S, Yang N, Jin Y, Li D, Xu Y, Xu X, *et al.* Development of an innovative induction heating technique for the treatment of liquid food: Principle, experimental validation and application. *Journal of Food Engineering*. 2020;271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109780>
18. Soloviev SV, Morozov VV, Radkevich EV, Kartashov LP, Makarovskaya ZV. Rationale of parameters of constructive elements of an induction heater for pasteurizing milk in a stream. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2019;75(1):100–103. (In Russ.). [Обоснование параметров конструктивных элементов индукционного нагревателя для пастеризации молока в потоке / С. В. Соловьёв [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2013. Т. 75. № 1. С. 100–103.]. <https://www.elibrary.ru/YXZMVV>
19. Kazakov RA, Darda IV, Zvolinskiy VP. Main ideas of theoretical analysis of ecology efficiency of metallurgical enterprises. *Modern Problems of Science and Education*. 2012;(4). (In Russ.). [Казакон Р. А., Дарда И. В., Зволинский В. П. Основы теоретического анализа энергетической и экологической эффективности металлургических предприятий // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4.]. <https://www.elibrary.ru/PBIQVX>
20. Başaran A, Yılmaz T, Çivi C. Application of inductive forced heating as a new approach to food industry heat exchangers. A case study – Tomato paste pasteurization. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2018;134:2265–2274. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7250-7>
21. Bejan A. Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture. *International Journal of Energy Research*. 2002;26(7):545–565. <https://doi.org/10.1002/er.804>
22. Bagaev AA, Bobrovskiy SO. Results of simplified mathematical modeling of liquid temperature distribution in the heat exchange channel of an electric heater with an internal heat source. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2021;204(10):117–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2021-204-10-117-122>
23. Increasing the thermal stability of milk: A solution for lower labor costs and better products [Internet]. [cited 03 Oct 2022]. Available from: <https://snab.ru/news/povyshenie-termoustoychivosti-moloka-reshenie-pozvolyayushchee-sokratit-trudozatraty-i-proizvodit-ka>