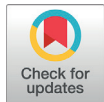


ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ / ELECTRICAL TECHNOLOGY AND ELECTRICAL EQUIPMENT

<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.367-391>EDN: <https://elibrary.ru/sjigxr>

УДК / UDK 637.233:637.133.3

Оригинальная статья / Original article

Научно-методические основы расчета параметров электродного термосифонного нагревателя молока при пастеризации

А. А. Багаев, С. О. Бобровский *Алтайский государственный аграрный университет,
г. Барнаул, Российская Федерация, <https://ror.org/01jsr8a3>** sergej.bobrovskij.95@mail.ru*

Аннотация

Введение. Термическая обработка способствует повышению качества молока и молочных продуктов, снижая количество патогенных микроорганизмов и ферментных систем при условии определенных сочетаний температурных режимов и времени нагрева. Наибольшей эффективностью обладает система «термосифонный пастеризатор с использованием прямого или косвенного электронагрева» с замкнутым циклом парообразования и конденсации. При этом существует необходимость снижения затрат энергии на нагрев молока и разработки методики расчета проточного нагревателя молока при пастеризации, учитывающей расчетные, гидро- и термодинамические характеристики электродного нагревателя.

Цель исследования. Теоретическое и экспериментальное обоснование методики расчета параметров проточного электродного термосифонного нагревателя, позволяющей повысить коэффициент полезного действия нагревателя молока в технологическом процессе пастеризации при заданной конечной температуре и производительности в установившемся равновесном режиме.

Материалы и методы. Используются основные положения теории технической гидро- и термодинамики, теплообмена и теплопередачи, методы теории подобия, электротермии и электродного нагрева сопротивлением.

Результаты исследования. Описана методика расчета параметров на примере электродного термосифонного нагревателя со змеевиковым теплообменником из пищевой нержавеющей стали. Она предусматривает последовательное определение: составляющих тепловых потоков в термосифонном электродном нагревателе при изохорном термодинамическом режиме; расхода конденсата; площади нагрева змеевикового теплообменника при заданной производительности по молоку; мощности электродного нагревательного устройства; геометрических размеров электродной системы. После этого подразумевается экспериментальная поверка и проверка по допустимым значениям напряженности электрического поля и плотности тока.

© Багаев А. А., Бобровский С. О., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Обсуждение и заключение. Представленная методика расчета позволяет в равновесном режиме теплообмена согласовать геометрические и энергетические характеристики электродной системы электротехнологического нагревателя с параметрами змеевикового теплообменника известной производительности по молоку, с результатами экспериментальной проверки предлагаемой технологии с учетом гидро- и термодинамических параметров. Практическая значимость заключается в обоснованной возможности снижения затрат энергии на нагрев молока в термических процессах обработки на 15–16 % по сравнению с известными технологиями, где коэффициент полезного действия составляет 84–88 %. Перспективным направлением является изучение влияния саморегулирования мощности нагревателя при использовании компенсационной емкости и уровня водного раствора электролита в межэлектродном промежутке на результаты нагрева с последующей оптимизацией параметров и режимов.

Ключевые слова: нагрев молока, пастеризация, снижение затрат энергии, электро-термия, электродный нагрев, термосифон, змеевиковый теплообменник

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Багаев А.А., Бобровский С.О. Научно-методические основы расчета параметров электродного термосифонного нагревателя молока при пастеризации. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(2):367–391. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.367-391>

Scientific and Methodological Bases for Calculating the Parameters of Electrode Thermosiphon Milk Heaters in Pasteurizing

A. A. Bagaev, S. O. Bobrovskiy 

Altai State Agricultural University,
Barnaul, Russian Federation, <https://ror.org/01jsr8a33>

 sergej.bobrovskij.95@mail.ru

Abstract

Introduction. Thermal treatment is a technology that ensures guaranteed quality of milk and dairy products in terms of pathogenic microorganisms and enzyme systems, under specific combinations of temperature regimes and heating times. The most effective is the “thermosiphon pasteurizer using direct or indirect electrical heating” with a closed cycle of vaporization and condensation. But it is important to reduce energy costs for heating milk and develop a calculation method for a tankless milk heater parameters for pasteurizing taking into account the hydro-thermodynamic and design characteristics of the electrode heater.

Aim of the Study. The study is aimed at developing the theoretical and experimental justification of a method for calculating the parameters of a tankless electrode thermosiphon heater to increase the efficiency of the milk heater in pasteurizing at a given final milk temperature and capacity in a steady-state equilibrium mode.

Materials and Methods. There were used the basic provisions of the theory of hydrodynamics and thermodynamics, heat exchange and heat transfer, the methods of similarity theory, electrothermics and electrode resistance heating.

Results. There has been described the technique for calculating parameters on the example of an electrode thermosiphon heater with a coil heat exchanger made of food-grade stainless steel. This technique includes the sequential determination of: the components of heat

flows in a thermosiphon electrode heater under an isochoric thermodynamic regime; the flow rate of condensate; the heating area of a coil heat exchanger at given milk production rate; the power of an electrode heating device; the geometric dimensions of an electrode system. After this, experimental verification and testing of permissible values of electric field strength and current density are implied.

Discussion and Conclusion. The presented calculation method allows in the equilibrium heat exchange mode agreeing the geometric and energy characteristics of the electrode system of the electro-technological heater with the parameters of the coil heat exchanger of known milk productivity, the results of the experimental verification of the proposed technology, taking into account the hydro- and thermodynamic parameters. The results of the study not contradict the results of the previous research conducted by the authors. The practical significance lies in the justified possibility of reducing the energy consumption for heating milk in thermal processing by 15–16% compared to the known technologies with a coefficient of efficiency of 84–88%. A promising area of research aimed at reducing energy consumption for milk heating, depending on the initial data of the technological process, is the study of the effect of self-regulation of the heater power using a compensatory capacity and the level of the aqueous solution.

Keywords: milk heating, pasteurization, reducing energy consumption, electrothermics, electrode heating, thermosiphon, coil heat exchanger

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Scientific and Methodological Bases for Calculating the Parameters of Electrode Thermosiphon Milk Heaters in Pasteurizing. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(2):367–391. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26362.367-391>

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности технологических процессов переработки сельскохозяйственной продукции, включая пастеризацию молока и молочных продуктов, производимых в фермерских и личных подсобных хозяйствах, является актуальной научно-технической проблемой.

Тематика исследования соответствует важнейшим направлениям развития сельского хозяйства Российской Федерации: приоритету Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации¹ – переход к высокопродуктивному и экологически чистому агро- и аквахозяйству, разработка и внедрение систем рационального применения средств химической и биологической защиты сельскохозяйственных растений и животных, хранение и эффективная переработка сельскохозяйственной продукции, создание безопасных и качественных, в том числе функциональных, продуктов питания; одной из ключевых задач Федеральной научно-технической программы «Развитие сельского хозяйства на 2017–2030 гг.»² – создание и внедрение современных технологий производства, переработки и хранения сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия.

¹ О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента РФ от 28 февраля 2024 г. № 145. [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (дата обращения: 22.06.2025).

² Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2030 годы. Постановление Правительства РФ от 25 августа 2017 г. № 996. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/71755402/> (дата обращения: 22.06.2025).

Известные инновационные методы обеззараживания молока (ультразвуковые, облучательные, гидродинамические и др.), конечной целью которых является уничтожение патогенной микрофлоры и ее ферментных систем (фосфатаза), характеризуются или недостаточной изученностью, или малой производительностью, или периодичностью и в настоящее время не получили широкого распространения.

Термическая обработка по-прежнему является технологией, обеспечивающей гарантированное качество молока и молочных продуктов по низкому содержанию патогенных микроорганизмов и ферментных систем при условии определенных сочетаний температурных режимов и времени нагрева. Однако традиционные методы нагрева молока, такие как «пар-молоко» и «горячая вода – молоко», функционирующие с разомкнутым циклом нагрева первичного теплоносителя из внешнего источника с низкой энтальпией, характеризуются высокой энергоемкостью.

Противоречие между необходимостью снижения энергозатрат на нагрев молока в процессе пастеризации и отсутствием методов, а также технических средств для его реализации составляет содержание научно-технической проблемы.

Решением может служить исключение этапа нагрева первичного теплоносителя с повышением его энтальпии или организация процесса без его использования. Повышение энтальпии первичного теплоносителя возможно с использованием термосифонного цикла с замкнутым циклом парообразования и конденсации без использования внешнего источника посредством косвенного элементного, прямого электродного или индукционного нагрева. Особенностью термосифонного термодинамического процесса является равенство температур, обладающих различными значениями энтальпии конденсата и конденсирующегося пара. Полный отказ от нагрева первичного теплоносителя предполагает применение индукционного нагрева теплообменника.

Кроме того, известные методики расчета параметров и режимов работы проточных электродных нагревателей не учитывают процессы гидро- и термодинамики и теплообмена.

Целью исследования является оценка затрат энергии на нагрев молока путем обоснования и использования методики расчета параметров электродного термосифонного нагревателя молока при пастеризации. Для этого необходимо проанализировать существующие технологии нагрева молока в процессе пастеризации; разработать методику расчета электродного термосифонного нагревателя и изготовить экспериментальную установку на основании расчетных параметров; провести экспериментальные исследования нагрева молока с использованием этой установки, дать оценку затрат энергии на нагрев и представить статистическую оценку результатов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время известны такие методы нагрева пищевых материалов в процессе обеззараживания, как обработка ультразвуком, инфракрасным и ультрафиолетовым облучением, энергией солнца, токами сверхвысокой частоты и др.

Исследователи из Австралии и Саудовской Аравии систематизировали результаты исследований в области ультразвуковой обработки молока и молочных

продуктов, оценили ее эффективность и перспективы применения в промышленности [1]. Дальнейшие исследования должны быть направлены на преодоление существующих ограничений (неравномерность обработки в больших объемах, высокая стоимость оборудования, необходимость точного контроля параметров для предотвращения нежелательных изменений продукта, потребность в комбинировании с другими методами для уничтожения спор) и оптимизацию технологии для широкого промышленного применения.

Анализ других исследований демонстрирует развитие нетепловых и комбинированных методов пастеризации в молочной промышленности, включая технологии с применением инфракрасного и ультрафиолетового излучения [2–4]. Оба метода характеризуются недостаточной экспериментальной проверкой и отсутствием комплексной оценки качества продукта и экономической эффективности. Для практического внедрения данных технологий требуются дополнительные экспериментальные исследования и оптимизация конструкции под реальные производственные условия.

Зарубежные исследователи подтверждают принципиальную возможность использования солнечной энергии для пастеризации молока, но выявляют общие недостатки и направления для совершенствования технологии [5; 6]. К ним относятся: сильная зависимость производительности от погодных условий; длительное время нагрева; зависимость от интенсивности солнечной радиации; необходимость резервных источников тепла в пасмурную погоду. Наибольший потенциал солнечная пастеризация имеет в солнечных регионах с высокой инсоляцией и ограниченным доступом к традиционным источникам энергии.

Проведены исследования технологии пастеризации посредством воздействия токов сверхвысокой частоты [7; 8]. Указанные удельные энергетические затраты в диапазоне 4,35–5,55 Вт·ч/л на порядок ниже значений, типичных для процессов нагрева пищевых продуктов. Проведение дополнительных опытных проверок позволит либо выявить погрешности в ранее полученных данных, либо объяснить механизм, обеспечивающий снижение энергозатрат.

Разработан и протестирован прототип нетеплового пастеризатора для молока на основе электрического поля [9]. Ученые из Пакистана рассмотрели различные нетепловые методы обработки молока (электрическое поле, высокое гидростатическое давление, ультразвук, облучение, холодная плазма и др.), их влияние на патогенные и вызывающие порчу микроорганизмы, а также на качество продукта [10]. Широкое применение нетепловых методов обработки продукта ограничено техническими проблемами масштабирования, коррозией, перегревом и гидравлическим сопротивлением, недостатком долгосрочных данных о стабильности продукта и неполнотой информации о влиянии на все компоненты молока.

В настоящее время распространение получили технологии нагрева молока и молочных продуктов, в которых промежуточным теплоносителем выступает вода или водяной пар той или иной степени насыщения [11; 12]. В этом случае система характеризуется разомкнутым циклом подачи питательной воды в зону нагрева или парообразования из внешнего источника. Процесс нагрева воды и получения водяного пара носит неспецифический характер и может быть обеспечен в том

числе такими известными электротехнологическими средствами, как косвенный (элементный) или прямой (электродный, индукционный) нагрев.

Оценка потенциальной возможности применения индукционного нагрева пищевых продуктов с анализом перспектив развития и недостатков предпринята в исследованиях зарубежных и российских ученых [13–15]. Применение данного метода обработки сопряжено с определенными недостатками: неравномерное распределение теплового потока по сечению трубы может приводить к перегреву и пригоранию молока возле стенок, в то время как в глубине потока продукт не успевает прогреться до необходимой температуры; требуется адаптация конструкций для равномерного нагрева молока в потоке [16–18]. Установлено, что индукционные коаксиальные нагреватели промышленной частоты отличаются большими габаритами и низким КПД по причине превышения токов в индукторе над токами в нагреваемой трубе [19].

Произведен анализ трех процессов нагрева молока: традиционного с разомкнутым циклом подачи питательной воды в зону нагрева и парообразования из внешнего источника; термосифонного электродного с замкнутым циклом парообразования и конденсации без использования внешнего источника питающей воды; индукционного на основании энергетического и эксергетического анализа [20]. При этом в качестве оценки энергетической эффективности процесса принят коэффициент полезного действия, основанный на первом законе термодинамики. В свою очередь, оценка эксергетической эффективности основана на втором законе термодинамики и представляет собой отношение эксергии на выходе (общей выработке энергии) к эксергии на входе (общей потребляемой энергии).

На основании результатов проведенного сопоставительного анализа установлено, что наибольшей энергоэффективностью с точки зрения энергетического и эксергетического анализа обладает система «нагреватель термосифонного типа с использованием прямого или косвенного электронагрева», преимущество которой обусловлено замкнутым циклом парообразования, при котором в пар превращается конденсат, имеющий температуру пара, и позволяет снизить энергозатраты на 15–16 %.

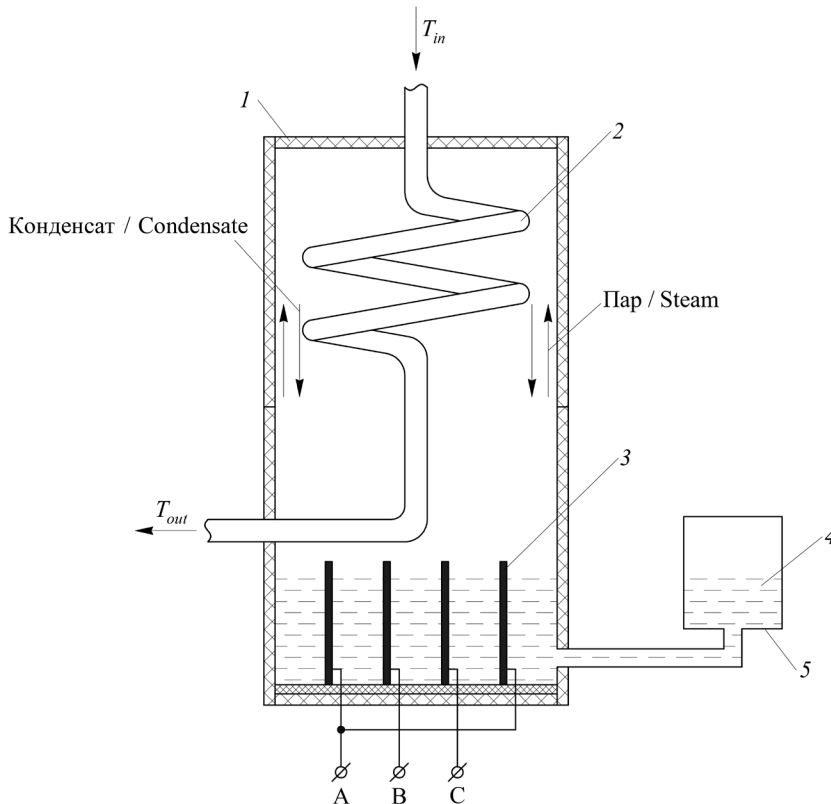
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В основу принципа работы и устройства, принятого в качестве объекта исследования положены разработанные патенты [21; 22]. Рассматривается термосифонный электродный пастеризатор со змеевиковым теплообменником и плоскопараллельной системой электродов, общий вид которого представлен на рисунке 1.

Устройство содержит корпус 1 с неизменным внутренним объемом, внутри которого располагается змеевиковый теплообменник 2 из аустенитной нержавеющей стали AISI-304 и система плоскопараллельных электродов 3, межэлектродное расстояние которой заполняется водой 4. Электроды подключаются к трехфазной системе напряжения, а через теплообменник пропускается нагреваемое молоко. В результате протекания электрического тока вода, заполняющая межэлектродное пространство, нагревается до температуры кипения и, преобразуясь в пар, по-

ступает к теплообменнику. Пар конденсируется на внешней поверхности трубы теплообменника и отдает свою внутреннюю энергию нагреваемому молоку. Образовавшийся конденсат частично возвращается в межэлектродное пространство как напрямую, так и через компенсационную емкость 5, что обеспечивает замкнутость цикла и стабильность работы устройства.



Р и с. 1. Устройство и принцип действия термосифонного электродного проточного пастеризатора:

- 1 – корпус; 2 – змеевиковый теплообменник из нержавеющей стали AISI-304;
3 – плоскопараллельная система электродов; 4 – первичный теплоноситель (вода);
5 – компенсационный резервуар

F i g. 1. Device and principle of operation of a thermosiphon electrode tankless pasteurizer:
1 – body; 2 – coil heat exchanger made of AISI-304 stainless steel; 3 – flat-parallel electrode system;
4 – primary heat carrier (water); 5 – compensation tank

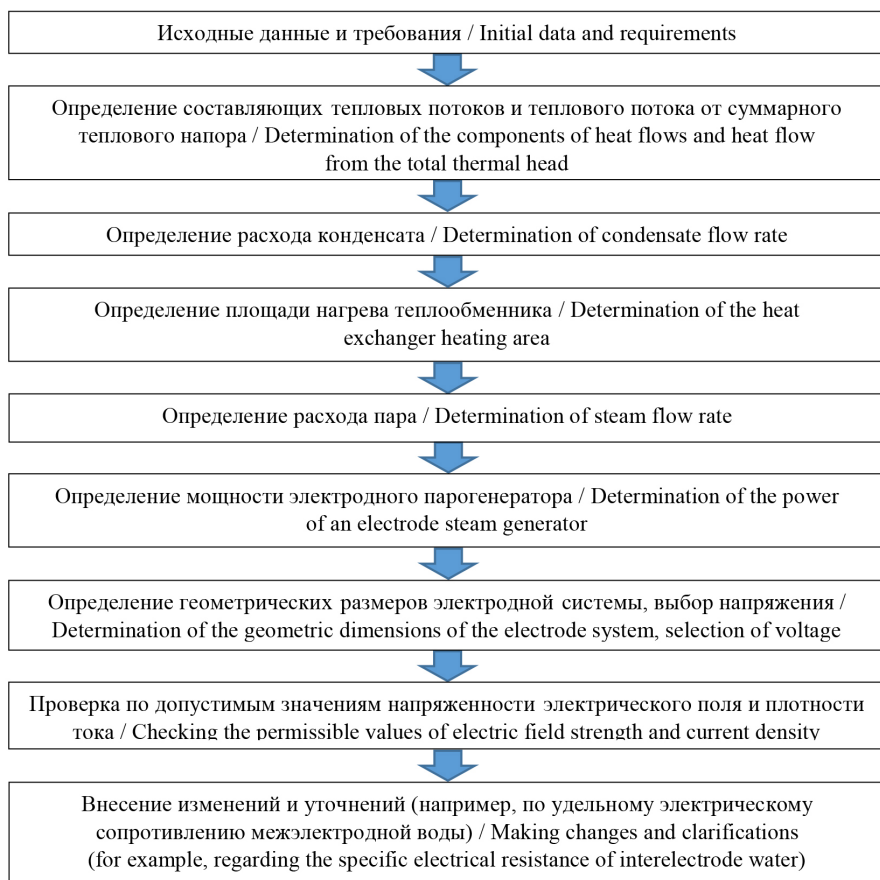
Примечание: T_{in} – температура молока на входе в теплообменник, °C; T_{out} – температура молока на выходе, °C.

Note: T_{in} – milk temperature at the inlet to the heat exchanger, °C; T_{out} – milk temperature at the outlet, °C.

Источник: рисунки 1, 3, 4, 8, 9 составлены авторами статьи в программе Компас 16.

Source: figures 1, 3, 4, 8, 9 are compiled by the authors using the program Compass 16.

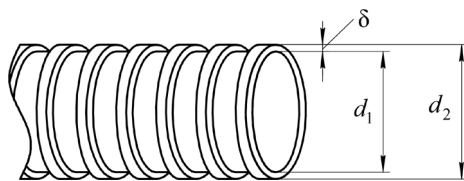
Структура предлагаемой методики показана на рисунке 2.



Р и с. 2. Структура предлагаемой методики
F i g. 2. Structure of the proposed methodology

Источник: рисунок 2 составлен авторами статьи.
Source: figure 2 was compiled by the authors of the article.

С целью обобщения результатов исследования рассмотрены два варианта исполнения змеевикового теплообменника. В соответствии с первым, теплообменник выполнен в виде гофрированной трубки из нержавеющей стали AISI-304 со средним внутренним диаметром $d_{1avr} = 14,5$ мм, средним внешним диаметром $d_{2avr} = 16,5$ мм (рис. 3).



Р и с. 3. Общий вид и размеры гофрированной трубки змеевикового теплообменника из нержавеющей стали AISI-304

Fig. 3. General view and dimensions of a corrugated tube of a coil heat exchanger made of AISI 304 stainless steel

Примечание: δ – толщина стенки теплообменника, м; d_1 – внутренний диаметр трубки теплообменника, м; d_2 – внешний диаметр трубки теплообменника, м.

Note: δ – the heat exchanger wall thickness, m; d_1 – the inner diameter of the heat exchanger tube, m; d_2 – outer diameter of the heat exchanger tube, m.

Второй вариант предусматривает использование негофрированной стандартной трубки с внутренним диаметром $d_1 = d_{1avr}$ и внешним диаметром $d_2 = d_{2avr}$, что не оказывает влияния на ход дальнейших рассуждений. Второй вариант при нагреве молока является более предпочтительным в силу отсутствия белково-жировых отложений на внутренней поверхности теплообменника и упрощения санитарных мероприятий в процессе промывки оборудования.

Методы, оборудование и процедура исследования

В качестве материалов исследования были использованы молоко с расходом $G_1 = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{ч}$, водные растворы электролита с удельным сопротивлением $\rho = 264 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при содержании соли 2 мг/кг, нержавеющая сталь AISI 304.

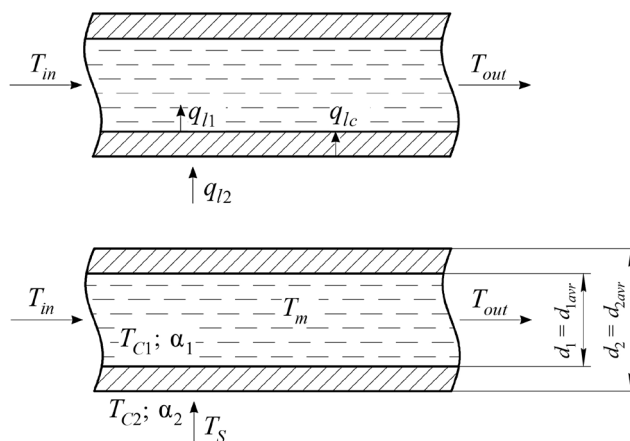
Использованы основные положения теории и методы технической гидро- и термодинамики, теплоотдачи при конденсации пара и вынужденном движении жидкости в трубе теплопередачи через стенку теплообменника, методы теории подобия, электротермии и электродного прямого нагрева сопротивлением, методы измерения электротехнических величин.

Процедура исследования включала: определение параметров проточного электродного термосифонного нагревателя молока согласно условиям технического задания в соответствии с разработанной концепцией методики расчета; изготовление прототипа нагревательной установки и экспериментальную проверку ее работоспособности; статистическую обработку воспроизводимости результатов. В процессе испытаний использованы технические средства измерения температуры, давления пара и регистрации электротехнических параметров. Расход и температура продукта контролировались расходомером YF-B7 и цифровым измерителем температуры TM902C, давление пара – манометром TM-510P. Ток, напряжение и мощность $P_{exc, los.}$, кВт, фиксировались измерительным комплексом K-505.

На внешней поверхности змеевикового теплообменника конденсируется водяной пар с давлением $p = 2,0245 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при температуре $120 \text{ }^\circ\text{C}$, источником которого является электродный парогенератор. Конденсат имеет температуру конденсирующегося пара, но обладает в результате теплообмена в 5 с лишним раз меньшим значением энтальпии. В этом заключается особенность

рассматриваемого замкнутого термодинамического цикла. Расход нагреваемого молока $G_1 = 8,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{мин} = 498 \text{ кг/ч} \approx 500 \text{ кг/ч}$. Начальная температура охлажденного молока на входе в теплообменник $T_{in} = 4^\circ\text{C}$, конечная на выходе – $T_{out} = 76^\circ\text{C}$. Теплопроводность нержавеющей стали AISI-304 $\lambda_{\text{AISI}} = 16,2 \dots 16,3 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$, ее удельное электрическое сопротивление $\rho_{\text{AISI-304}} = 7,2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при температуре 20°C . Анализ произведен в предположении, что термодинамический процесс считается изохорным, т. е. предполагает постоянство объема испарительно-конденсационной системы при отсутствии совершаемой паром внешней работы.

На рисунке 4 представлена схема тепловых потоков, отнесенных к 1-му м трубки теплообменника, имеющих место в процессе функционирования устройства.



Р и с. 4. Схема тепловых потоков, отнесенных к 1-му м трубки теплообменника

F i g. 4. Diagram of heat flows per 1 m of heat exchanger tube

Примечание: q_{l1} – тепловой поток, передаваемый от внутренней поверхности трубки теплообменника к молоку, Вт/м^2 ; q_{l2} – тепловой поток, передаваемый от конденсирующегося пара к внешней поверхности трубки теплообменника, Вт/м^2 ; q_{lc} – тепловой поток, передаваемый через стенку трубки теплообменника, Вт/м^2 ; T_{c1} – температура внутренней поверхности трубки теплообменника, $^\circ\text{C}$; T_{c2} – температура внешней поверхности трубки теплообменника, $^\circ\text{C}$; T_s – температура конденсирующегося пара, $^\circ\text{C}$; T_m – средняя температура молока, $^\circ\text{C}$; α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубки теплообменника к нагреваемой среде, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; α_2 – коэффициент теплоотдачи от пара к внешней поверхности трубки теплообменника, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Note: q_{l1} – heat flow transferred from the inner surface of the heat exchanger tube to the milk, W/m^2 ; q_{l2} – heat flow transferred from the condensing vapor to the outer surface of the heat exchanger tube, W/m^2 ; q_{lc} – heat flow transferred through the wall of the heat exchanger tube, W/m^2 ; T_{c1} – temperature of the inner surface of the heat exchanger tube, $^\circ\text{C}$; T_{c2} – temperature of the outer surface of the heat exchanger tube, $^\circ\text{C}$; T_s – temperature of condensing steam, $^\circ\text{C}$; T_m – average milk temperature, $^\circ\text{C}$; α_1 – heat transfer coefficient from the inner surface of the heat exchanger tube to the heated medium, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; α_2 – the coefficient of heat transfer from steam to the outer surface of the heat exchanger tube, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$.

Перечисленные тепловые потоки должны быть определены в функции соответствующих температур. Поставленную задачу решили графоаналитическим методом.

Определение теплового потока, передаваемого от внутренней поверхности трубки теплообменника к молоку

В рассматриваемом диапазоне температур молока от 4 до 76 °С зависимости тепловых потоков $q_l = f(\Delta T_1)$, показанные на рисунке 4, являются линейными. Предварительными исследованиями³ установлено, что для определения результирующего теплового потока $q_l = q_{l1} + q_{l2} + q_{lc}$, равного сумме теплового потока передаваемого молоку q_{l1} от пара q_{l2} через стенку теплообменника q_{lc} , разность температур между внутренней поверхностью трубки теплообменника и средней температурой молока ΔT_1 для реализации длительного режима пастеризации при 63–65 °С в течение 30–40 мин должна быть равной 65 °С, для кратковременной пастеризации в течение 15–20 с – $\Delta T_1 \approx 70$ °С, для высокотемпературной при 85–90 °С без выдержки – $\Delta T_1 \approx 75$ °С. В связи с указанным для определения $q_{l1} = f(\Delta T_1)$ приняли разность температур между внутренней поверхностью трубки теплообменника и средней температурой молока $\Delta T_1 = 65, 70$ и 75 °С.

Тогда $T_{c1} = \Delta T_1 - T_m = 105, 110$ и 115 °С.

При средней температуре нагреваемого молока $T_m = (T_{in} + T_{out})/2 = 40$ °С молоко имеет следующие параметры: плотность $\rho = 1\,020$ кг/м³, удельная теплоемкость $c = 3,96$ кДж/(кг·°С) = 1,16 (Вт·ч)/(кг·°С), теплопроводность $\lambda_{m1} = 0,564$ Вт/(кг·°С), кинематическая вязкость $\nu = 1,02 \cdot 10^{-6}$ м²/с, динамическая вязкость $\mu = \nu\rho = 0,00104$ Па·с, число Прандтля $Pr = 7,29$.

В этом случае число Рейнольдса определяли в соответствии с известным в теории теплоотдачи при вынужденном движении жидкости в трубе выражением:

$$Re_{m1} = \frac{4G_1}{\pi d_{1avr} \cdot 10^{-3} \cdot 3\,600\mu} = 1,173 \cdot 10^4$$

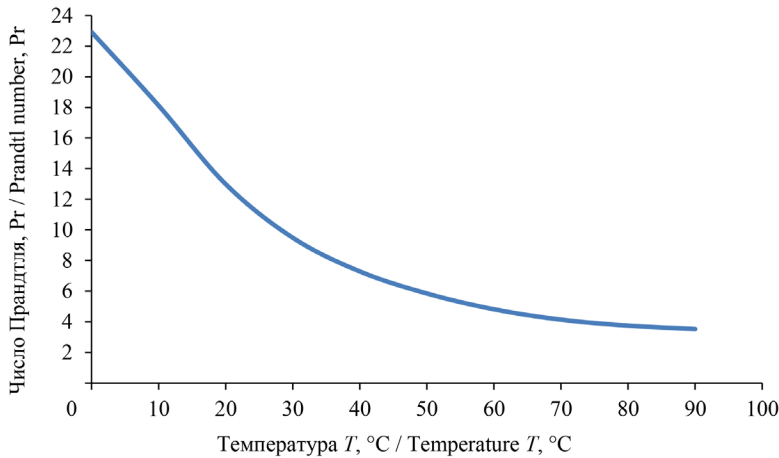
где G_1 – расход нагреваемой среды, м³/ч.

Режим течения молока турбулентный. Тогда при $T_{c1} = 105$ °С и $\Delta T_1 = 65$ °С число Нуссельта определяли по формуле

$$Nu_{m1} = 0,021 \cdot Re_{m1}^{0,8} \cdot Pr_{m1}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{m1}}{Pr_C} \right)^{0,25} = 106,47,$$

где индексы « $m1$ » и « C » означают, что физические свойства жидкости выбираются соответственно по среднеарифметической температуре молока T_m и температуре стенки теплообменника T_{c1} . Для молока в общем случае число Прандтля определяли расчетным путем по известным значениям плотности, теплоемкости, кинематической вязкости, теплопроводности и характеру течения молока [2]. В первом приближении предельное значение числа Прандтля для молока известно только для граничной температуры 90 °С и равно $Pr_C = 3,53$ (рис. 5), которое в дальнейшем использовали при определении чисел Нуссельта и α_1 для $T_{c1} = 105, 110 \cdot 115$ °С.

³ Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче: учеб. пособие для вузов. М.: Энергия; 1980. 288 с.



Р и с. 5. Зависимость числа Pr молока от температуры T , °C
F i g. 5. Dependence of the Pr number of milk on the temperature T , °C

Источник: рисунок 5 составлен авторами статьи по данным источника⁴.
Source: figure 5 is compiled by the authors of the article based on the source data⁴.

Коэффициент теплоотдачи α_1 , Вт/(м²·с)

$$\alpha_1 = Nu_{m1} \frac{\lambda_{m1}}{d_{1avr}} = 4\,140,$$

и тепловой поток, передаваемый от внутренней поверхности трубки теплообменника к молоку q_{1l} , Вт/м, при $T_{c1} = 105$ °C

$$q_{1l} = \alpha_1 \Delta T_1 \pi d_{1avr} = 12\,252,12.$$

При $T_{c1} = 110$ °C, $\Delta T_1 = 70$ °C, $\alpha_1 = 4\,140$ Вт/(м²·с), $Nu_{m1} = 106,47$:

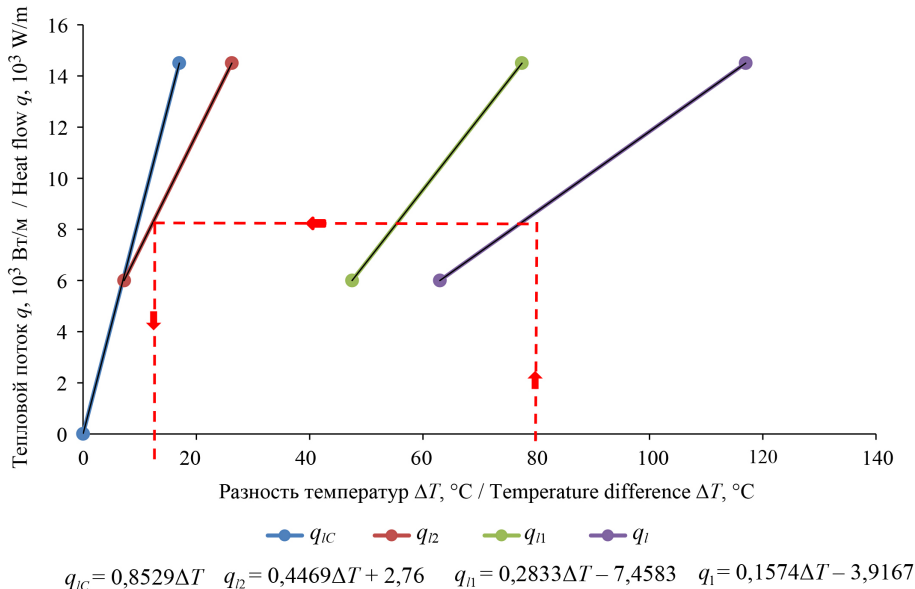
$$q_{1l} = \alpha_1 \Delta T_1 \pi d_{1avr} = 13\,194,594.$$

При $T_{c1} = 115$ °C, $\Delta T_1 = 75$ °C, $\alpha_1 = 4\,140$ Вт/(м²·с), $Nu_{m1} = 106,47$:

$$q_{1l} = \alpha_1 \Delta T_1 \pi d_{1avr} = 14\,137,065.$$

Соответствующая зависимость $q_{1l} = f(\Delta T_1)$ показана на рисунке 6.

⁴ Плотность молока, его удельная теплоемкость и другие физические свойства [Электронный ресурс]. Thermalinfo.ru: сайт. URL: <http://thermalinfo.ru/svojstva-produktov/molochnye-produkty/svojstva-moloka-plotnost-vyazkost-teploprovodnost-i-teploemkost> (дата обращения: 10.07.2025).



Р и с. 6. Зависимости составляющих тепловых потоков от разностей температур

Fig. 6. Dependences of heat flow components on temperature differences

Примечание: q_l – результирующий тепловой поток, Вт/м²; ΔT – разность температур, °C.
 Note: q_l – the resulting heat flow, W/m²; ΔT – temperature difference, °C.

Источник: рисунок 6 составлен авторами статьи в программе Microsoft Excel.
 Source: figure 6 is compiled by the authors of the article using the program Microsoft Excel.

Определение теплового потока q_{IC} , передаваемого через стенку трубки теплообменника

Теплопроводность нержавеющей стали AISI-304 $\lambda_{AISI} = 16,2 \dots 16,3$ Вт/(м·град) принимается независимой от температуры $\lambda_{AISI} \neq f(\Delta T_C)$. В связи с этим функция $q_{IC} = f(\Delta T_C)$ является линейной, и тепловой поток q_{IC} , Вт/м, при $\Delta T_C = (T_{C2} - T_{C1}) = 2^\circ\text{C}$ принял значение

$$q_{IC} = (T_{C2} - T_{C1}) \frac{2\pi\lambda_{AISI}}{2,3 \lg \frac{d_{2avr}}{d_{1avr}}} = 1575,75.$$

Зависимость $q_{IC} = f(\Delta T_C)$ приведена на рисунке 6.

Определение теплового потока q_{D2} , передаваемого от конденсирующегося пара к внешней поверхности трубки теплообменника

Витки змеевикового теплообменника рассматривали как горизонтальные трубы, а режим конденсации пара считался пленочным. В этом случае зависимость $q_{D2} = f(\Delta T_{C2})$ находилась с использованием известной формулы Д. А. Лабунцова для коэффициента теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке трубки теплообменника

$$\alpha_2 = 3,25 \frac{A^{0,75}}{B} \cdot \frac{1}{\left(\pi \frac{d_{2avr}}{2} \Delta T_{C2} \right)^{0,25}}, \quad (1)$$

где A и B – комплексы, зависящие от температуры паровой фазы. Тогда тепловой поток 1 м

$$q_{l2} = \alpha_2 \pi d_{2avr} \Delta T_{C2} = 3,25 \frac{A^{0,75}}{B} \cdot \frac{2\pi \frac{d_{2avr}}{2} \Delta T_{C2}}{\left(\pi \frac{d_{2avr}}{2} \Delta T_{C2} \right)^{0,25}} = 6,5 \frac{\left(\pi A \frac{d_{2avr}}{2} \Delta T_{C2} \right)^{0,75}}{B}. \quad (2)$$

При $p = 2,02 \cdot 10^5$ Па и $T_s = 120$ °С значения комплексов A и B для воды⁵ принимали $A = 70,31$ (м·град), $B = 7,65 \cdot 10^{-3}$ м/Вт.

Следовательно, в соответствии с выражением (2),

$$q_{l2} = 1\,330,38 \cdot \Delta T_{C2}^{0,75}. \quad (3)$$

Задавшись $\Delta T_{C2} = 10,15$ и 20 °С, получили соответственно $q_{l2}^{10^\circ\text{C}} = 7\,476,73$ Вт/м; $q_{l2}^{15^\circ\text{C}} = 10\,137,49$ Вт/м; $q_{l2}^{20^\circ\text{C}} = 12\,581,4$ Вт/м.

Зависимость $q_{l2} = f(\Delta T_{C2})$ приведена на рисунке 6.

Зависимость результирующего теплового потока от суммарного теплового напора

$\Delta T = T_s - T_m$ нашли путем суммирования найденных выше трех зависимостей q_{l1} , q_{lC} и q_{l2} . Результирующий тепловой поток $q_l = f(T_s - T_m)$ показан на рисунке 6.

Отложив по оси абсцисс заданное значение общего температурного напора $\Delta T = T_s - T_m = 120 - 40 = 80$ °С и проведя вертикаль до пересечения с кривой $q_l = f(T_s - T_m)$, на оси ординат нашли искомое значение теплового потока (рис. 6): $q_l = 9\,300$ Вт/м.

Определение расхода конденсата

При $T_s = 120$ °С теплота парообразования $r = 2\,202,8$ кДж/кг, тогда расход конденсата на 1 м длины трубки змеевикового теплообменника G_1 , кг/(м·ч):

$$G_1 = \frac{q_l}{r} 3\,600 = 15,19. \quad (4)$$

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С)

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_w}{\lambda_{AISI}} + \frac{1}{\alpha_2}} = 2\,873,56, \quad (5)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности трубки теплообменника к молоку, $\alpha_1 = 4\,140$ Вт/(м²·с); α_2 – коэффициент теплоотдачи

⁵ Лабунцов Д.А. Теплоотдача при пленочной конденсации чистых паров на вертикальных поверхностях и горизонтальных трубах. М.: Издательство МЭИ; 2000. 388 с.

от конденсирующегося пара ко внешней поверхности трубки теплообменника; δ_w – толщина стенки трубки змеевикового теплообменника, $\delta_w = 1 \cdot 10^{-3}$ м.

В формуле (5) коэффициент теплоотдачи $\alpha_2 = 207,09 \cdot 10^3$ Вт/(м² · с) определяли по формуле (1), в которой при $p = 2,02 \cdot 10^5$ Па и $T_s = 120$ °С значения комплексов для воды принимают $A = 70,3$ 1/(м · град), $B = 7,65 \cdot 10^{-3}$ м/Вт. При заданном значении общего температурного напора $\Delta T = T_s - T_m = 120 - 40 = 80$ °С температурный напор $\Delta T_{C2} = 14$ °С определяли с использованием зависимости $q_{12} = f(\Delta T_{C2})$, (рис. 6).

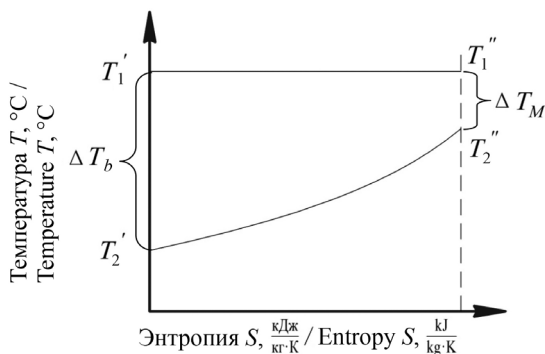
Тепловой поток Q для нагрева молока, Вт, удельная теплоемкость которого $c = 3,96$ кДж/(кг · град) = 1,16 Вт/(кг · град) с начальной температурой на входе в теплообменник $T_{in} = 4$ °С, конечной на выходе $T_{out} = 76$ °С и расходом $G_1 = 8,3 \cdot 10^{-3}$ м³/мин = 498 кг/ч $\approx$ 500 кг/ч определяли по формуле Ньютона:

$$Q = G_1 c (T_{out} - T_{in}) = 41\,760. \quad (6)$$

Средняя логарифмическая разность температур теплоносителей при конденсации пара:

$$\Delta T_{sr} = \frac{\Delta T_b - \Delta T_{min}}{2,3 \lg \frac{\Delta T_b}{\Delta T_{min}}} = 74,71, \quad (7)$$

где $\Delta T_b = T'_1 - T'_2 = 120 - 4 = 116$ °С и $\Delta T_{min} = T''_1 - T''_2 = 120 - 76 = 44$ °С определяли по T - S диаграмме на рисунке 7.



Р и с. 7. T - S диаграмма изменения температуры теплоносителей при конденсации пара

F i g. 7. T - S diagram of heat carrier temperature change during steam condensation

Источник: рисунок 7 составлен авторами статьи по данным источника⁶.

Source: figure 7 is compiled by the authors of the article based on the source data⁶.

⁶ Богословский В.Н., Поз М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1983. 320 с.

Необходимая площадь нагрева F , м^2 с использованием результатов расчетов по формулам (5)–(7)

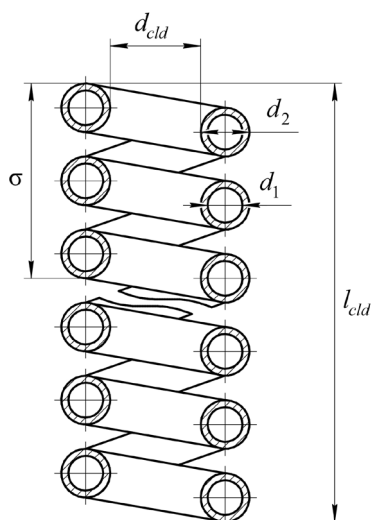
$$F = \frac{Q}{k\Delta T_{avr}} = 0,19.$$

Длина трубки змеевикового теплообменника l , м

$$l = \frac{F}{\pi d_{2avr}} = 3,75.$$

Если внутренний диаметр воображаемого цилиндра, образованного внутренними поверхностями витков змеевикового теплообменника, равен $d_{cld} = 0,056$ м, то длина окружности внешней поверхности этого цилиндра равна $L = \pi d_{cld} = 0,176$ м, а число витков теплообменника, выполненного из трубки нержавеющей стали AISI-304, равно $n = l/L = 21,3$.

На рисунке 8 представлены геометрические размеры трех витков, высота которых с учетом воздушного зазора составила $\sigma = 0,05$ м.



Р и с. 8. Геометрические размеры элемента змеевикового теплообменника из 3 витков

F i g. 8. Geometric dimensions of a coil heat exchanger element with 3 coils

Примечание: σ – высота теплообменника из трех витков, м; d_{cld} – внутренний диаметр цилиндра теплообменника, м; l_{cld} – высота теплообменника, м.

Note: σ – the height of the three-coil heat exchanger, m; d_{cld} – the inner diameter of the heat exchanger cylinder, m; l_{cld} – height of the heat exchanger, m.

Тогда высота змеевикового теплообменника с числом витков $n = l/L = 21,3$, выполненного из трубки AISI-304 средним внешним диаметром $d_{2avr} = 0,0165$ м и длиной $l = 3,75$ м, составила $l_{cld} = 0,35$ м, что значительно повысило компактность устройства.

Суммарный расход конденсата G_{Σ} , кг/м с учетом выражения (4)

$$G_{\Sigma} = G_1 l = 56,96.$$

Расход пара, кг/ч

$$D = \frac{Q}{(i_{ist} - i_{cnd})\eta} = 71,78,$$

где Q – тепловой поток для нагрева молока, определяемый по формуле (6), $Q = 41\,760$ Вт; i_{ist} – энтальпия пара при температуре $120\,^{\circ}\text{C}$, $i_{ist} = 646,4$ ккал/кг = $2\,708,416$ кДж/кг = $752,34$ Вт·ч/кг; i_{cnd} – энтальпия конденсата при температуре $120\,^{\circ}\text{C}$, $i_{ist} = 120,3$ ккал/кг = $504,057$ кДж/кг = 140 Вт·ч/кг; η – КПД, $\eta = 0,95$.

Мощность электродного парогенератора P , Вт:

– в разомкнутом цикле с использованием внешней питательной воды

$$P = \frac{D(i_{ist} - i_{fw})}{\eta} = 55\,083,2, \quad (8)$$

где i_{fw} – энтальпия питательной воды в разомкнутом цикле, например, при температуре $20\,^{\circ}\text{C}$, $i_{fw} = 20,04$ ккал/кг = $83,96$ кДж/кг = $23,32$ Вт·ч/кг.

– в замкнутом цикле без использования внешней питательной воды

$$P = \frac{D(i_{ist} - i_{fw})}{\eta} = \frac{D(i_{ist} - i_{cnd})}{\eta} = 46\,267,12, \quad (9)$$

где $i_{fw} = i_{cnd}$.

Коэффициент полезного действия в разомкнутом цикле $\eta = Q/P = 0,758$, в замкнутом цикле $\eta = 0,9$.

Сравнение результатов расчета по формулам (8) и (9) свидетельствует о том, что использование замкнутого термосифонного цикла обеспечивает снижение мощности и коэффициента полезного действия на 16 %.

Определение геометрических размеров плоскопараллельной электродной системы

Схема рассчитываемой электродной системы представлена на рисунке 9.

Сопротивление воды в межэлектродном пространстве R , Ом:

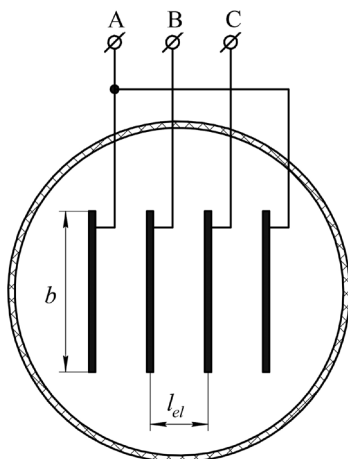
$$R = \frac{(n-1)U^2}{P} = 9,36,$$

где U – напряжение, $U = 380$ В; P – мощность, $P = 46\,267,12$ Вт; n – число электродов, $n = 4$.

Расстояние между электродами l_{el} , м:

$$l_{el} = \frac{U}{E_{apb}} = 2,53 \cdot 10^{-2},$$

где E_{apb} – допустимая напряженность электрического поля в межэлектродном пространстве, $E_{apb} = 150 \cdot 10^2$ В/м.



Р и с. 9. Схема плоскопараллельной электродной системы парогенератора

F i g. 9. Scheme of a flat-parallel electrode system of a steam generator

Примечание: b – ширина электродов, м; l_{el} – межэлектродное расстояние, м.

Note: b – width of the electrodes, m; l_{el} – interelectrode distance, m.

Проводимость воды в межэлектродном пространстве σ , $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$

$$\sigma = 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot x,$$

где x – солесодержание, например $x = 2$ мг/кг.

Тогда удельное электрическое сопротивление воды межэлектродном пространстве $\rho = 1/\sigma = 264 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Удельное сопротивление пароводяной смеси ρ_{mxt} , $\text{Ом} \cdot \text{м}$:

$$\rho_{mxt} = 1,5\rho = 396 \cdot 10^{-2}.$$

Высота электродов h , м.

$$h = \frac{l_{el} \rho_{mxt}}{bR} = 10,7 \cdot 10^{-2},$$

где b – ширина электрода, выбираемая из конструктивных соображений, например, $b = 10 \cdot 10^{-2}$ м.

Плотность тока на электродах и проверка по допустимой плотности тока

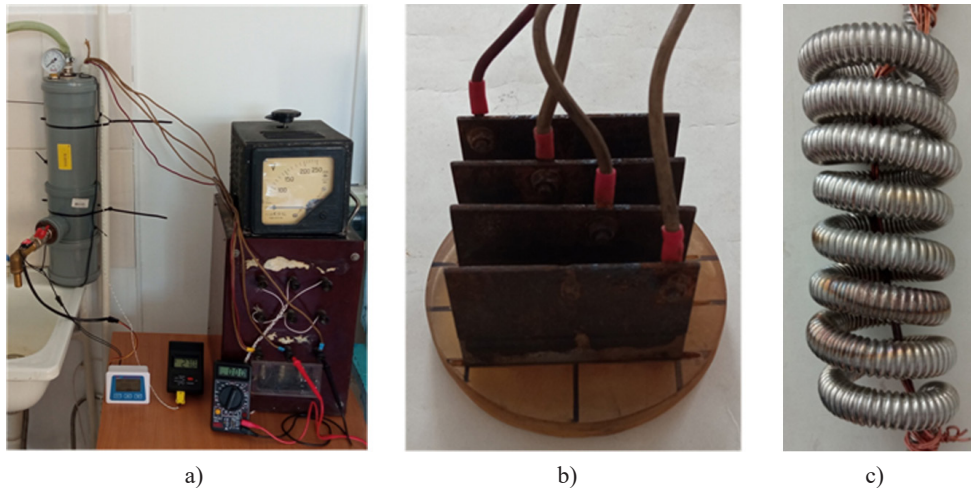
Максимальная плотность тока $j_{\max}$, А/м^2 :

$$j_{\max} = \frac{1,2U}{l_{el} \rho_{mxt}} = 0,45 \cdot 10^4.$$

Полученное значение $j_{\max}$ меньше допустимого для плоскопараллельных электродов $j_{apb} = 0,5 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$. Таким образом, результат проверки по допустимой плотности тока на электродах соответствует требованиям.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика использована при проведении серии экспериментальных исследований. Общий вид экспериментальной установки, электродной системы и змеевикового теплообменника представлены на рисунке 10. Электрическая схема показана на рисунке 9.



Р и с. 10. Общий вид:
а) экспериментальная установка; б) электродная система; в) змеевиковый теплообменник
F i g. 10. General view:
a) experimental setup; b) electrode system; c) coil heat exchanger

Источник: фотографии сделаны С. О. Бобровским при проведении измерений в лаборатории Алтайского государственного аграрного университета.

Source: the photos were taken by S. O. Bobrovsky during measurements in the laboratory of the Altai State Agrarian University.

Результаты измерения разности между конечной T_{out} и начальной T_{in} температурами нагрева ΔT , °С, мощности без учета потерь $P_{exc.los.}$, кВт, измеренной мощности P_{EXP} , кВт, средние значения КПД $\bar{\eta}_i$ и величины строчных дисперсий $S_{(\eta)_i}^2$ представлены в таблице. Мощность без учета потерь $P_{exc.los.}$, определяли по формуле (6). Коэффициент полезного действия определяли следующим образом

$$\eta = \frac{P_{exc.los.}}{P_{EXP}}.$$

Для расчета строчных дисперсий использовалось выражение $S_{(\eta)_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (\eta_{i,j} - \bar{\eta}_i)^2}{n-1}$, где $\sum_{j=1}^n (\eta_{i,j} - \bar{\eta}_i)^2$ представляет собой сумму квадратов ошибок наблюдений.

Среднее значение КПД $\bar{\eta}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i}{3}$, где $\sum_{i=1}^n \eta_i$ – сумма КПД параллельных опытов n , число которых принято равным 3.

Т а б л и ц а
T a b l e

Данные для осреднения и оценки воспроизводимости параллельных опытов
Data for averaging and evaluating the reproducibility of parallel experiments

Разность между конечной T_{out} и начальной T_{in} температурами нагрева, °C / The difference between the final T_{out} and initial heating T_{in} temperatures, °C	Мощность без учета потерь, кВт / Excluding losses, kW	Параллельные значения откликов / Parallel response values						Среднее значение КПД / The average value of the efficiency coefficient	Диспер- сия по строкам / Row-by-row variance
ΔT	$P_{exc.los.}$	Мощность измеренная, кВт / Measured power, kW			КПД / Efficiency factor			$\bar{\eta}_i$	$S^2_{(\eta)i}$
		P_{EXP}			$\eta = P_{exc.los.} / P_{EXP}$				
		P_{EXP1}	P_{EXP2}	P_{EXP3}	η_1	η_2	η_3		
76	72	47,80	48,360	46,210	0,87	0,86	0,90	0,8760	0,0010
76	66	46,49	45,388	43,325	0,82	0,84	0,88	0,8466	0,0001
75	60	40,78	41,260	39,386	0,80	0,85	0,88	0,8430	0,0005

Источник: таблица 1 составлена авторами статьи.

Source: the table 1 was compiled by the authors of the article.

Сумма построчных дисперсий по результатам трех параллельных опытов составляет $\sum_{i=1}^3 S^2_{(\eta)i} = 0,015$.

Максимальное значение построчной дисперсии $S^2_{(\eta)i, \max} = 0,001$.

Тогда фактическое значение критерия Кохрена $G = \frac{S^2_{(\eta)i, \max}}{\sum_{i=1}^3 S^2_{(\eta)i}} = 0,66$.

При числе степеней свободы $m_1 = n - 1 = 2$, где n – число параллельных опытов; m_2 – число строк эксперимента, $m_2 = 3$, табличное значение критерия Кохрена $G_{tab} = 0,8709$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Полученное значение G -критерия 0,66 не превышает табличного значения, следовательно, гипотеза об однородности построчных дисперсий принимается не противоречащей опытным данным.

Общая дисперсия воспроизводимости: $S^2_{(\eta)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2_{(\eta)i} = 0,0005$, где $N = m_2 = 3$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Методика расчета электродного термосифонного проточного пастеризатора молока со змеевиковым теплообменником позволила согласовать геометрические и энергетические характеристики электродной системы с энергетическими, гидро- и термодинамическими параметрами замкнутого термодинамического изохорного цикла, разработать, изготовить и провести ряд экспериментальных исследований при заданных параметрах (расход нагреваемого продукта, его начальная и конечная температура). Адекватность методики подтверждается результатами обработки экспериментальных данных: коэффициент полезного действия при реализации составил от 84 до 88 %, что на 15–16 % превышает аналогичный показатель при реализации традиционных способов нагрева молока в процессе пастеризации. Данный результат с высокой степенью достоверности соответствует ранее опубликованным выводам [20], полученным на основании проведенного энергетического и эксергетического анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование показало, что существующие процессы нагрева молока обладают рядом недостатков, связанных с необходимостью нагрева промежуточных теплоносителей в виде воды или пара в разомкнутом термодинамическом цикле, что сопровождается снижением коэффициента полезного действия процесса. Одним из направлений повышения КПД может рассматриваться организация процесса в замкнутом цикле с помощью электродного термосифонного нагревателя, промежуточным теплоносителем в котором является пар, обладающий внутренним энергосодержанием, в 6–7 раз превышающий энтальпию воды при той же температуре. Однако единая методика расчета указанных устройств отсутствовала.

Разработанная методика подразумевает соблюдение энергетического баланса в электродном термосифонном нагревателе молока при реализации замкнутого изохорного термодинамического цикла типа «генерация пара-конденсирующийся пар-нагреваемая среда-конденсат-генерация пара» в установившемся равновесном режиме. Он обеспечивает достижение требуемой конечной температуры нагреваемого продукта на выходе при заданной производительности с наибольшим коэффициентом полезного действия.

Представленная оригинальная методика объединяет ряд ранее разрозненных расчетных процедур термодинамического и электротехнологического характера и позволяет повысить коэффициент полезного действия нагревательного устройства в технологическом процессе пастеризации. Методика подтверждена и обоснована теоретическими, инженерными и экспериментальными средствами.

Практическая значимость исследования заключается в снижении удельных затрат энергии на нагрев молока в процессе термической обработки, в котором электродный термосифонный нагреватель может занять место пастеризатора. Перспективным направлением является исследование процесса саморегулирования мощности электродного генератора пара в установившемся равновесном режиме теплообмена в зависимости от температуры молока. Этого можно достичь посредством использования компенсационной емкости при корректировке температуры,

давления и объема паровой фазы с соответствующей регулировкой уровня первичного электролита в межэлектродном пространстве при изменении расхода и температуры молока, поступающего в пастеризатор из секций рекуперации и сепарирования пастеризационной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mahmoud M.Z., Davidson R., Abdelbasset W.K., Fagirya M.A. 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>
2. Антипов С.Т., Жучков А.В., Овсянников В.Ю., Бабенко М.С. математическое моделирование процесса инфракрасной пастеризации молока. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2013;(4):67–72. URL: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/534> (дата обращения: 16.07.2025).
3. Ansari J.A., Ismail M., Farid M. Extension of Shelf Life of Pasteurized Trim Milk Using Ultraviolet Treatment. *Journal of Food Safety*. 2020;40(2):e12768. <https://doi.org/10.1111/jfs.12768>
4. Рязанцева К.А., Шерстнева Н.Е. Традиционные и инновационные способы применения ультрафиолетового излучения в молочной промышленности. *Техника и технология пищевых производств*. 2022;52(2):390–406. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>
5. Setiawan B., Wakidah R.N., 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.ere.m.76.4.24411>
6. Tigabe S., Bekele A., Pandey V. Performance Analysis of the Milk Pasteurization Process Using a Flat Plate Solar Collector. *Journal of Engineering*. 2022;(1):6214470. <https://doi.org/10.1155/2022/6214470>
7. Al-Hilphy A.R.S., Ali H.I. Milk Flash Pasteurization by the Microwave and Study its Chemical, Microbiological and Thermo Physical Characteristics. *Journal of Food Processing & Technology*. 2013;4(7):1000250. URL: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/milk-flash-pasteurization-by-the-microwave-and-study-its-chemical-microbiological-and-thermo-physical-characteristics-33229.html> (дата обращения: 24.07.2025).
8. Roy J., Latif U.I., Mujnibeen M.S.A., Kabir M.S., Islam M.I., Alam K.S. Effect of Microwave Heat Treatment on the Quality of Milk. *International Journal of Recent Scientific Research*. 2017;8(9):19766–19771. URL: <https://www.recentscientific.com/effect-microwave-heat-treatment-quality-milk> (дата обращения: 24.07.2025).
9. Al-Hilphy A.R.S. 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>
10. Shabbir M.A., Ahmed H., Maan A.A., Rehman A., Afraz M.T., Iqbal M.W. и др. 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>
11. Tay T.T., Chua Y.L. High Temperature Short Time (HTST) Camel Milk Pasteurization Pilot Plant. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(15):6241–6245. URL: http://www.arnpjournals.com/jeas/volume_15_2015.htm (дата обращения: 16.07.2025).
12. Gana I.M. Design, Fabrication and Testing of Soya Milk Production and Pasteurization Mini Plant. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2017;19(4):45–53. URL: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/issue/archive> (дата обращения: 16.07.2025).
13. Başaran A., Yilmaz 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>
14. Başaran A., Yilmaz T., Azgın S.T., 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):128280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128280>
15. Razak A.R.A., Ibrahim N.M., Rahman A.S.F., Fayzul M., Azizan M.M., Hashim U. и др. Induction Heating as Cleaner Alternative Approach in Food Processing Industry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1878):012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012053>
 16. Wu S., Yang N., Jin Y., Li D., Xu Y., Xu X. и др. Development of an Innovative Induction Heating Technique for the Treatment of Liquid Food: Principle, Experimental Validation and Application. *Journal of Food Engineering*. 2020;(271):109780. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109780>
 17. Соловьев С.В., Морозов В.В., Радкевич Е.В., Карташов Л.П., Макаровская З.В. Обоснование параметров конструктивных элементов индукционного нагревателя для пастеризации молока в потоке. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019;1(75):100–103. URL: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (дата обращения: 03.08.2025).
 18. Неверов Е.Н., Владимиров А.А., Коротких П.С., Николаева Е.В., Порохнов А.Н. *Инженерные технологии и системы*. 2024;34(1):128–144. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.128-144>
 19. Багаев А.А., Бобровский С.О. Методика расчета, оценка энергетической эффективности и направления совершенствования низкотемпературных индукционных коаксиальных нагревателей молока промышленной частоты. *Вестник НГИЭИ*. 2023;(7):60–71. <https://www.elibrary.ru/ydscvr>
 20. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Electrotechnological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(2):272–278. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>
 21. Багаев А.А., Бобровский С.О., Левин А.М. Нагреватель жидкости. Патент 2791097 С1 Российская Федерация. 2 марта 2023. <https://elibrary.ru/vlzdfl>
 22. Багаев А.А., Багаев А.И. Нагреватель текучей среды. Патент 2156411 С1 Российская Федерация. 20 сентября 2000. <https://www.elibrary.ru/fbzvrX>

REFERENCES

1. Mahmoud M.Z., Davidson R., Abdelbasset W.K., Fagirya M.A. 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>
2. Antipov S.T., Zhuchkov A.V., Ovsyannikov B.Yu., Babenko M.S. Mathematical Modeling of Infrared Milk Pasteurization. *Vestnik Voronežskogo gosudarstvennogo universiteta inženernyh tehnologij*. 2013;(4):67–72. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.vestnik-vsuet.ru/vguit/article/view/534> (accessed 16.07.2025).
3. Ansari J.A., Ismail M., Farid M. Extension of Shelf Life of Pasteurized Trim Milk Using Ultraviolet Treatment. *Journal of Food Safety*. 2020;40(2):e12768. <https://doi.org/10.1111/jfs.12768>
4. Riazantseva K.A., Sherstneva N.E. Traditional and Innovative Uses of Ultraviolet Treatment in the Dairy Industry. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(2):390–406. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2372>
5. Setiawan B., Wakidah R.N., 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.erem.76.4.24411>
6. Tigabe S., Bekele A., Pandey V. Performance Analysis of the Milk Pasteurization Process Using a Flat Plate Solar Collector. *Journal of Engineering*. 2022;(1):6214470. <https://doi.org/10.1155/2022/6214470>
7. Al-Hilphy A.R.S., Ali H.I. Milk Flash Pasteurization by the Microwave and Study its Chemical, Microbiological and Thermo Physical Characteristics. *Journal of Food Processing & Technology*. 2013;4(7):1000250. Available at: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/milk-flash-pasteurization-by-the-microwave-and-study-its-chemical-microbiological-and-thermo-physical-characteristics-33229.html> (accessed 24.07.2025).

8. Roy J., Latif U.I., Mujnibee M.S.A., Kabir M.S., Islam M.I., Alam K.S. Effect of Microwave Heat Treatment on the Quality of Milk. *International Journal of Recent Scientific Research*. 2017;8(9):19766–19771. Available at: <https://www.recentscientific.com/effect-microwave-heat-treatment-quality-milk> (accessed 24.07.2025).
9. Al-Hilphy A.R.S. 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>
10. Shabbir M.A., Ahmed H., Maan A.A., Rehman A., Afraz M.T., Iqbal M.W., 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>
11. Tay T.T., Chua Y.L. High Temperature Short Time (HTST) Camel Milk Pasteurization Pilot Plant. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(15):6241–6245. Available at: http://www.arpnjournals.com/jeas/volume_15_2015.htm (accessed 16.07.2025).
12. Gana I.M. Design, Fabrication and Testing of Soya Milk Production and Pasteurization Mini Plant. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2017;19(4):45–53. Available at: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/issue/archive> (accessed 16.07.2025).
13. Başaran A., Yilmaz 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>
14. Başaran A., Yilmaz T., Azgın S.T., 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):128280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128280>
15. Razak A.R.A., Ibrahim N.M., Rahman A.S.F., Fayzul M., Azizan M.M., Hashim U., et al. Induction Heating as Cleaner Alternative Approach in Food Processing Industry. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1878):012053. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1878/1/012053>
16. 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):109780. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109780>
17. Soloviev S.V., Morozov V.V., Radkevich E.V., Kartashov L.P., Makarovskaya Z.V. Rationale of Parameters of Constructive Elements of an Induction Heater for Pasteurizing Milk in a Stream. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2019;(1):100–103. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://orensau.ru/ru/nauka/izvestiya-orenburgskogo-gau> (accessed 03.08.2025).
18. Neverov E.N., Vladimirov A.A., Korotkih P.S., Nikolaeva E.V., Porokhnov A.N. Scientific and Technical Basis for the Development of an Induction Heating Unit for Milk Pasteurization. *Engineering Technologies and Systems*. 2024;34(1):128–144. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.034.202401.128-144>
19. Bagaev A.A., Bobrovsky S.O. Low-Temperature Induction Coaxial Milk Heaters of Industrial Frequency: Calculation Methodology, Assessment of Energy Efficiency and Areas of Improvement. *Bulletin NGIEI*. 2023;(7):60–71. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/ydscvr>
20. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Electrotechnological Heat Treatment of Milk: Energy and Exergy Efficiency. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023;53(2):272–278. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-2-2428>
21. Bagaev A.A., Bobrovsky S.O., Levin A.M. Liquid Heater. Patent 2791097 C1 Russian Federation. 2023 March 2. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/vlzdfl>
22. Bagaev A.A., Bagaev A.I. Fluid Heater. Patent 2156411 C1 Russian Federation. 2000 September 20. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/fbzxvr>

Об авторах:

Багаев Андрей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрификации и автоматизации сельского хозяйства Алтайского государственного аграрного университета (656049, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Красноармейский, д. 98),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2586-2590>, Scopus ID: 57205438220, SPIN-код: 7421-2807, BAGAEV710@mail.ru

Бобровский Сергей Олегович, старший преподаватель кафедры электрификации и автоматизации сельского хозяйства Алтайского государственного аграрного университета (656049, Российская Федерация, г. Барнаул, пр. Красноармейский, д. 98), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9243-0179>, Scopus ID: 58608530600, SPIN-код: 5222-6537, sergej.bobrovskij.95@mail.ru

Вклад авторов:

А. А. Багаев – формулирование идеи исследования, целей и задач; разработка методологии исследования; деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности для первоначального и повторного использования; административное управление планированием и проведением исследования; контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования; проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы; создание и подготовка рукописи: критический анализ черновика рукописи, внесение замечаний и исправлений членами исследовательской группы, в том числе на этапах до и после публикации.

С. О. Бобровский – деятельность по аннотированию (созданию метаданных), очистке данных и поддержанию их целостности для первоначального и повторного использования; создание и подготовка рукописи: визуализация результатов исследования и полученных данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 10.11.2025; поступила после рецензирования 25.12.2025;
принята к публикации 20.01.2026*

About the authors:

Andrey A. Bagaev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agrarian University (98 Krasnoarmeysky Ave., Barnaul 656049, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2586-2590>, Scopus ID: 57205438220, SPIN-code: 7421-2807, BAGAEV710@mail.ru

Sergey O. Bobrovsky, Senior Lecturer at the Department of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agrarian University (98 Krasnoarmeysky Ave., Barnaul 656049, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9243-0179>, Scopus ID: 58608530600, SPIN-code: 5222-6537, sergej.bobrovskij.95@mail.ru

Authors contribution:

A. A. Bagaev – ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims; development or design of methodology; creation of models; management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use; oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team; verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication / reproducibility of results / experiments and other research outputs; preparation, creation and / or presentation of the published work by those from the original research group, specifically critical review, commentary or revision – including pre- or post-publication stages.

S. O. Bobrovsky – management activities to annotate (produce metadata), scrub data and maintain research data (including software code, where it is necessary for interpreting the data itself) for initial use and later re-use; preparation, creation and / or presentation of the published work, specifically writing the initial draft (including substantive translation).

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 10.11.2025; revised 25.12.2025; accepted 20.01.2026