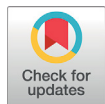


**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ /
ELECTRICAL TECHNOLOGY AND ELECTRICAL EQUIPMENT**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.578-594>EDN: <https://elibrary.ru/szuvt>

УДК / UDK 621.56:620.91

*Оригинальная статья / Original article***Эффективность теплообмена при нагреве
молока в системе «Солнечный коллектор –
пластинчатый теплообменник»****Ю. Б. Гербер , А. П. Вербицкий***Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского,
г. Симферополь, Российская Федерация, <https://ror.org/05erbjx97>** gerber_1961@mail.ru**Аннотация*

Введение. Переработка сельскохозяйственного сырья требует существенных энергетических затрат, составляющих значительную часть себестоимости готового продукта. Оптимизация системы нагрева продукта теплоносителем в пластинчатом теплообменнике позволит достичь рационального соотношения между скоростью нагрева и энергоэффективностью, что поспособствует улучшению экономических показателей производства.

Цель исследования. Определение зависимостей температуры нагреваемой жидкости от температуры и расхода теплоносителя, а также выявление оптимального соотношения расходов в контурах теплоносителя и нагреваемой жидкости для достижения максимальной эффективности теплопередачи.

Материалы и методы. Для исследования процесса нагрева жидкостным теплоносителем нагреваемой жидкости использовались трубчатый гелиоколлектор и лабораторный пластинчатый теплообменник, соединенные трубопроводами с соответствующей гидравлической арматурой. Исследование проведено при фиксированных расходах нагреваемой жидкости (молока) (3,5, 4,25 и 5,0 л/мин) и переменном расходе теплоносителя (0,80–3,5 л/мин), поступающего из гелиоколлектора. В качестве критерия эффективности работы теплообменника использовался коэффициент отдачи тепла k_o , определяемый как отношение разности температур нагреваемой жидкости к разности температур теплоносителя.

Результаты исследования. Рассмотрен процесс взаимодействия теплоносителя и нагреваемой жидкости (молока) в пластинчатом теплообменнике, работающем в паре с модулем солнечного нагрева. Температура продукта на выходе пропорционально зависит от расхода и температуры теплоносителя. Наибольший рост эффективности наблюдается при увеличении соотношения расходов теплоносителя и нагреваемой жидкости (Q_{nc}/Q_l) в диапазоне от 0,5 до 0,75. Дальнейшее увеличение соотношения до 1,0 ведет к росту в меньшей степени, выше 1,0 – к незначительному приросту эффективности.

© Гербер Ю.Б., Вербицкий А.П., 2026

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

Закключение. Оптимальное для энергетической эффективности соотношение расходов $Q_{hc}/Q_f = 0,7...1,0$. Это позволяет минимизировать энергозатраты на подачу (перекачку) теплоносителя при высоком (более 75 %) коэффициенте отдачи тепла. Результаты могут быть применены при проектировании и эксплуатации энергоэффективных систем подачи теплоносителя в агропромышленной сфере. Для обеспечения низкопотенциальных тепловых процессов и предварительного подогрева при дальнейшей высокотемпературной обработке (пастеризации) экономически целесообразно использование солнечной энергии.

Ключевые слова: эффективность теплообмена, солнечный коллектор, пластинчатый теплообменник, коэффициент отдачи тепла, возобновляемая энергетика, гелиосистема

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Гербер Ю.Б., Вербицкий А.П. Эффективность теплообмена при нагреве молока в системе «Солнечный коллектор – пластинчатый теплообменник». *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(3):578–594. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.578-594>

Heat Transfer Efficiency during Heating Milk in a Solar Collector-Plate Heat Exchanger System

Yu. B. Gerber[✉], A. P. Verbitsky

V. I. Vernadsky Crimean Federal University,

Simferopol, Russian Federation, <https://ror.org/05erbjx97>

[✉] gerber_1961@mail.ru

Abstract

Introduction. Processing agricultural raw materials requires significant energy cost that makes up a significant part of the finished product cost. Optimizing the product heating system with a heat transfer fluid in a plate heat transfer unit will allow achieving a rational balance between heating rate and energy efficiency that will help to improve economic indicators of production.

Aim of the Study. The study is aimed at determining the dependences of the temperature of the being heated liquid on the temperature and flow rate of the heat transfer fluid, and at identifying the optimal ratio of the heat transfer fluid flow rate and being heated liquid to achieve maximum heat transfer efficiency.

Materials and Methods. A tubular solar collector and a laboratory plate heat transfer unit connected by pipelines and appropriate hydraulic fittings were used to study the process of heating liquid with a heat transfer fluid. The studies were conducted at fixed flow rates of the being heated liquid (milk) (3.5, 4.25 and 5.0 l/min), and a variable heat transfer fluid flow rate (0.80–3.5 l/min), incoming from the solar collector. As a criterion for the efficiency of the heat transfer unit system, there was used the heat transfer coefficient k_o , which is defined as the ratio of the temperature difference between the being heated liquid (milk) and the temperature differential of the heat transfer fluid.

Results. There have been considered the process of the interaction between a heat transfer fluid and a being heated liquid (milk) in a plate heat transfer unit operating in pairs with a solar heating module. The outlet product temperature depends proportionally on the flow rate and temperature of the heat transfer fluid. The greatest increase in efficiency is observed when the ratio of the heat transfer fluid flow rate and being heated liquid flow rate (Q_{hc}/Q_f) is increased from 0.5 to 0.75. A further increase in the ratio to 1.0 leads to a smaller increase in efficiency, while an increase above 1.0 results in a slight increase in efficiency.

Conclusion. As a result of the conducted study and data processing, there has been found that the optimal ratio Q_{hc}/Q_l for energy efficiency is 0.7...1.0, which minimizes energy consumption for the supply (pumping) of the heat transfer fluid while ensuring a high (more than 75%) heat transfer coefficient. The results can be applied in the design and operation of energy-efficient systems for heat transfer fluid supply in the agro-industrial sector. The use of solar energy is economically feasible for low-potential thermal processes and preheating for further high-temperature processing (pasteurization).

Keywords: heat exchange efficiency, solar collector, plate heat exchanger, heat transfer coefficient, renewable energy, heliosystem

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Gerber Yu.B., Verbitsky A.P. Heat Transfer Efficiency during Heating Milk in a Solar Collector-Plate Heat Exchanger System. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(3):578–594. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.26363.578-594>

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность процессов теплопередачи и теплообмена является одной из ключевых задач в энергетике, пищевой промышленности, холодильной технике и многих других отраслях промышленности. Основным аппаратом, в котором осуществляется данный процесс, является теплообменник, от оптимальных режимов работы которого напрямую зависят энергозатраты, экономические показатели и экологичность технологических циклов. Несмотря на развитый теоретический базис и многообразие конструктивных решений, задача поиска оптимальных режимов эксплуатации для конкретных условий остается актуальной [1–3].

Основными регулируемыми параметрами в системе с двумя контурами (теплоноситель и нагреваемая жидкость – продукт) часто являются их расход и температура на входе¹. При этом температура нагреваемой жидкости на выходе, ключевая целевая переменная, формируется под сложным взаимным влиянием этих факторов. С одной стороны, изменение расходов напрямую влияет на коэффициент теплопередачи, интенсифицируя или замедляя процесс [4]. С другой стороны, оно же определяет величину среднего логарифмического температурного напора – движущей силы процесса. Это приводит к тому, что зависимость конечной температуры от расходов носит экстремальный характер, следовательно, существует такое оптимальное соотношение расходов, при котором эффективность теплопередачи достигает максимума.

Под эффективностью данного процесса можно понимать как максимальную тепловую мощность при фиксированных размерах аппарата, так и минимизацию эксплуатационных затрат, учитывающих энергию на прокачку теплоносителей. Таким образом, увеличение расходов не всегда является рациональным. Требуется научно обоснованный подход к выбору режимных параметров.

Развитие возобновляемой энергетики является одним из ключевых направлений для снижения зависимости от традиционных ископаемых ресурсов и уменьшения

¹ Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена (процессы переноса в движущейся среде). М.: Высшая школа; 1974. 328 с.

антропогенной нагрузки на окружающую среду² [5]. Среди технологий возобновляемых источников энергии солнечное теплоснабжение демонстрирует высокую эффективность для систем горячего водоснабжения в условиях умеренного климата³ [6]. Таким образом, сочетание использования менее дорогого источника энергии для теплового процесса и оптимизация теплопередачи позволит повысить эффективность тепловой обработки при производстве продуктов питания, в частности, молочных.

Целью исследования является экспериментальное определение зависимости температуры нагреваемой жидкости и коэффициента отдачи тепла от расхода и температуры теплоносителя в контуре пластинчатого теплообменника, а также выявление оптимального соотношения расходов, обеспечивающего высокую энергетическую эффективность системы. Для этого требуется: создание экспериментальной установки с необходимыми приборами, оборудованием; проведение исследований в солнечное время суток; обработка полученных данных.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Вопросам теплопередачи посвящены классические труды по теории теплообмена авторов А. С. Гухмана⁴, В. П. Исаченко⁵, В. А. Осипова, Дж. Х. Линхард. В работах этих ученых приведены фундаментальные уравнения для расчета конвективного теплообмена и теплопроводности. Ключевой является зависимость коэффициента теплоотдачи от режима течения (критерии Рейнольдса, Прандтля, Нуссельта) и свойств жидкости. И. Е. Семенов, А. Ю. Маскинская, Д. А. Алхасова, Н. Ю. Никулин провели теплотехнические и гидродинамические исследования, направленные на интенсификацию тепловых процессов в пластинчатых аппаратах. Ими также была изложена теория теплообменных аппаратов. В основе конструкции пластинчатых теплообменных аппаратов лежат результаты исследований теплогидродинамических процессов в каналах сложной геометрии [4; 7; 8]. Однако конкретные рекомендации по выбору динамических режимов работы теплообменников в связке с гелиосистемами отсутствуют.

Типовая система солнечного горячего водоснабжения включает в себя гелиоколлектор, теплообменный аппарат и бак-аккумулятор [6; 9]. Пластинчатые теплообменники широко применяются в таких системах благодаря своей компактности, высоким коэффициентам теплопередачи и возможности работы при относительно низких перепадах температур⁶ [10; 11].

² Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. М.: Энергоатомиздат; 1986. 384 с.

³ Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена (процессы переноса в движущей среде).

⁴ Гухман А. А. Об основаниях термодинамики.

⁵ Исаченко В.П., Солодов А.П., Якушева Е.В. Теплообмен при конденсации водяного пара, содержащего добавки октадециламина, на вертикальной пластине. *Теплоэнергетика*. 1983;(9). URL: <https://unilibrary.ru/articles/journals/teplojenergetika/teplojenergetika-1983/teplojenergetika-1983-09/isachenko-vp-solodov-ap-jakusheva-ev-teploobmen-pri-kondensacii-vodjanogo-para-soderzhashhego-dobavki-oktadecilamina-na-vertikalnoj-plastine> (дата обращения: 15.10.2025).

⁶ Там же.

Эффективность работы всей системы в значительной степени определяется режимом теплообмена между контуром теплоносителя (воды, антифриза) от солнечного коллектора и контуром нагреваемой жидкости (продукта). Применительно к агропромышленному производству это может быть молоко, соки и др. Ключевыми управляющими параметрами в контурах являются расходы [12]. Многие исследования посвящены оценке влияния на протекание процесса конструктивных параметров теплообменника [13–15], поиску оптимальных конструктивных и технологических параметров, а также материалов, повышающих коэффициент полезного действия устройств [16–18].

Неоптимальное соотношение расходов может привести либо к недостаточному использованию теплового потенциала теплоносителя (низкая температура нагреваемой среды на выходе), либо к избыточным энергозатратам на подготовку и подачу теплоносителя через контур гелиоколлектора [19–21]. Кроме того, указанное отклонение негативно сказывается на конструктивных параметрах теплообменника, ведет к неоправданно завышенным размерам установки, увеличению ее массы и повышению стоимости [22]. Несмотря на существование теоретических моделей, практические данные, позволяющие верифицировать эти модели и дать конкретные рекомендации для инженерного проектирования, отсутствуют.

Новизна настоящего исследования заключается в установлении количественной зависимости коэффициента отдачи тепла от соотношения расходов для конкретной конфигурации системы солнечного теплоснабжения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

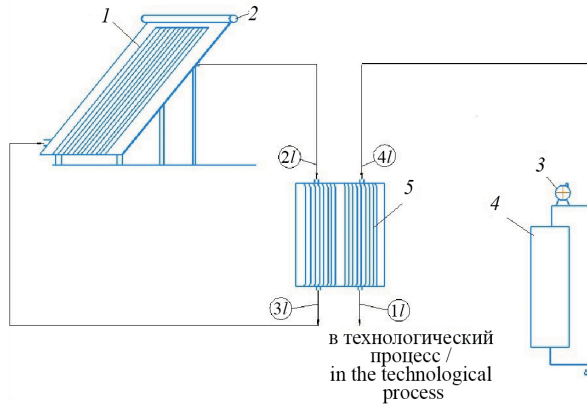
В качестве объекта исследования рассматривался процесс нагрева жидкости жидкостным теплоносителем в пластинчатом теплообменнике в зависимости от соотношения расходов первичного теплоносителя в гелиоколлекторе Q_{hc} и нагреваемой жидкости Q_r .

Материалы и оборудование

Эксперименты проводились в лаборатории кафедры технологий и оборудования производства и переработки продукции животноводства Агротехнологической академии. Была собрана лабораторная установка. Схема подключения датчиков температуры представлена на рисунке 1.

В теплообменник 5 подавалась вода, нагретая в гелиоколлекторе 1, а также продукт, подлежащий нагреву – молоко. Контур 1 (4I–1I) – часть трубопроводов системы, по которым движется молоко: продукт с постоянным входным расходом ($Q_i = \text{const}$) и начальной температурой 16–17 °С. Контур 2 (2I–3I) – часть трубопроводов системы, по которым движется теплоноситель – вода, предварительно нагретая в модуле гелионагрева, с переменным расходом Q_{hc} .

Общий вид экспериментальной установки и блок замера температур показан на рисунках 2–4.



Р и с. 1. Схема экспериментального стенда с указанием точек измерения температуры:

1 – гелиоколлектор; 2 – бак-аккумулятор нагретой воды; 3 – насос;
4 – накопитель проточной воды; 5 – пластинчатый теплообменник

F i g. 1. Experimental setup diagram with temperature measurement points:

1 – solar collector; 2 – heated water storage tank; 3 – pump; 4 – flow water storage tank;
5 – plate heat transfer unit

Примечание: 1l – выход нагреваемого продукта; 2l – вход теплоносителя; 3l – выход теплоносителя; 4l – вход нагреваемого продукта.

Note: 1l – heated product outlet; 2l – heat transfer fluid inlet; 3l – heat transfer fluid outlet; 4l – heated product inlet.

Источник: рисунок 1 составлен авторами статьи в программе КОМПАС-график.

Source: Figure 1 was compiled by the authors of the article in the program KOMPAS-Graphic.



Р и с. 2. Общий вид экспериментальной установки:

1 – бак-аккумулятор; 2 – гелиоколлектор; 3 – теплообменник

F i g. 2. General view of the experimental setup:

1 – accumulator tank; 2 – solar collector; 3 – heat transfer unit

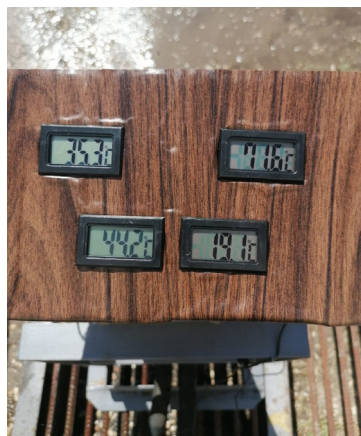
Источник: фотографии для рисунков 2–4 были сделаны в период проведения экспериментов 06.08.2025–11.08.2025 в павильоне механизации института «Агротехнологическая академия» Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского.

Source: The photos for figures 2–4 were taken during the period of the experiments (06.08.2025–08.11.2025), in the pavilion of mechanization of the Agrotechnological Academy, V. I. Vernadsky Crimean Federal University.



Р и с. 3. Соединение контура гелиоколлектора с теплообменником

F i g. 3. Connecting the solar collector circuit to the heat exchanger



Р и с. 4. Блок электронной регистрации температуры в точках подачи и выхода теплоносителя и нагреваемой жидкости

F i g. 4. Electronic temperature recording unit at the inlet and outlet of the heat transfer fluid and being heated liquid

Процедура исследования

В ходе эксперимента фиксировались температуры на входе и выходе обоих контуров (датчики 1/–4/). Серии экспериментов проводились в трех повторностях для трех фиксированных значений расхода продукта: $Q_{p1} = 3,5$ л/мин, $Q_{p2} = 4,25$ л/мин, $Q_{p3} = 5,0$ л/мин. В каждой серии варьировался расход теплоносителя Q_{hc} .

В качестве интегрального критерия эффективности теплообмена был принят коэффициент отдачи тепла k_o , рассчитываемый по формуле:

$$k_o = \frac{\Delta T_p}{\Delta T_{hc}} = \frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3},$$

где T_1 – температура продукта на выходе, °C; T_4 – температура продукта на входе, °C; T_2 – температура теплоносителя на входе, °C; T_3 – температура теплоносителя на выходе °C. Данный коэффициент характеризует долю реально переданной тепловой энергии по отношению к максимально возможной в идеальном случае. Данное выражение получено в результате рассмотрения частного случая – равенства правых частей уравнений теплового баланса для продукта:

$$Q_p = M_p c_p (T_{kp} - T_{np}),$$

где M_p – масса продукта, кг; c_p – теплоемкость продукта, Дж/(кг·К); T_{kp} , T_{np} – конечная и начальная температура продукта, °C.

Для теплоносителя:

$$Q_{hc} = M_{hc} c_{hc} (T_{khc} - T_{nhc}),$$

где M_{hc} – масса теплоносителя, кг; c_{hc} – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); T_{khc} , T_{nhc} – конечная и начальная температуры теплоносителя, °C. В данном случае задача теплообмена рассмотрена для отношения разностей соответствующих температур.

Для расчета характеристик течения молока взяты исходные справочные характеристики. Плотность $\rho = 1\,030$ кг/м³; динамическая вязкость $\mu = 2,5 \cdot 10^{-3}$ Па·с; кинематическая вязкость $\nu = \mu/\rho = 2,43 \cdot 10^{-6}$ м²/с; теплопроводность $\lambda = 0,55$ Вт/(м·К); удельная теплоемкость $C_p = 3\,900$ Дж/(кг·К); коэффициент температуропроводности $\alpha = \lambda/(\rho C_p) = 1,37 \cdot 10^{-7}$ м²/с; коэффициент объемного расширения $\beta = 4,5 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Зависимость температурных параметров от расхода теплоносителя

Проведены шесть опытов при различных значениях температуры теплоносителя. С помощью температурных датчиков в каждом опыте замеряли значения температур продукта и теплоносителя на выходе и входе (рис. 4). Полученные в результате измерений сведены в таблицу 1.

Т а б л и ц а 1

Table 1

Зависимость температурного режима теплообменника от расхода теплоносителя в контуре гелионагрева для $Q_p = 5,0$ л/мин

Dependence of the heat transfer unit temperature on the heat transfer fluid flow rate in the heliothermy circuit $Q_p = 5.0$ L/min

№ датчика / № sensor	Вариант 1 / Option 1		Вариант 2 / Option 2		Вариант 3 / Option 3		Вариант 4 / Option 4		Вариант 5 / Option 5		Вариант 6 / Option 6	
	Q_{hc}^*	t^{**}	Q_{hc}	t	Q_{hc}	t	Q_{hc}	t	Q_{hc}	t	Q_{hc}	t
1	0,8	21,6	1,5	21,9	2,0	23,1	2,5	23,1	3,0	23,9	3,5	27,9
2	–	44,2	–	45,8	–	46,1	–	46,8	–	47,8	–	48,6
3	–	25,1	–	25,8	–	27,3	–	27,8	–	28,4	–	33,4
4	–	16,9	–	16,9	–	16,9	–	16,9	–	16,9	–	16,9

Источник: таблицы 1–4 составлены авторами статьи.

Source: The tables 1–4 were compiled by the authors of the article.

Примечание: *Расход, л/мин; **Температура, °C.

Note: *Consumption, L/min; **Temperature, °C.

Переменной величиной был расход теплоносителя Q_{hc} ; расход нагреваемого продукта оставался постоянным, $Q_p = 5,0$ л/мин.

Полученные замеры позволили определить температурный прирост нагреваемого продукта в теплообменнике ΔT_p , температурную разность, отданную теплоносителем ΔT_{hc} , и рассчитать коэффициент отдачи тепла в теплообменнике k_o (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Показатели эффективности работы теплообменника
Performance indicators of the heat transfer unit

№ варианта / № option	ΔT_p	ΔT_{hc}	k_o	$k_o, \%$
1	4,7	20,0	0,235	23,5
2	5,2	19,1	0,272	27,2
3	6,5	18,5	0,351	35,1
4	7,8	17,5	0,446	44,6
5	9,0	16,8	0,536	53,6
6	11,0	15,2	0,724	72,4

Расчеты основных показателей течения молока по трубам и секциям теплообменника при различных значениях скоростей с учетом исходных свойств молока дали следующие результаты (табл. 3).

Таблица 3

Table 3

Гидравлические характеристики перемещения молока в технологическом оборудовании
Hydraulic characteristics of milk movement in processing equipment

Скорость V_{tr} , м/с / Speed V_{tr} , m/s	Число Рейнольдса Re / The Reynolds number	Режим течения / Flow mode	Число Нуссельта Nu / The Nusselt number
0,2	4 115	Ламинарный / Laminar Flow	43,6
0,3	6 173	Переходный / Transitional	78,5
0,5	10 288	Начало Турбулентного / The Beginning of the Turbulent	109,0
0,8	16 461	Турбулентный / Turbulent	162,0
1,0	20 576	Турбулентный / Turbulent	190,0

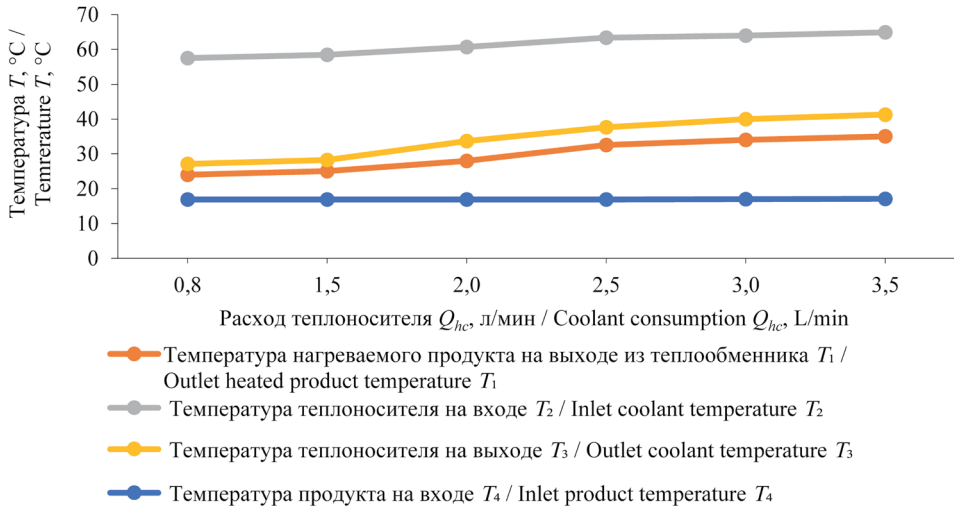
Данные показатели характерны для транспортировки молока. При движении в секциях теплообменника скорость перемещения составляет:

$$V_t = (0,5 \dots 0,6) V_{tr},$$

где V_t – скорость движения молока в теплообменнике, м/с; V_{tr} – допустимая скорость транспортировки молока для условий, указанных в таблице, м/с.

Характер движения молока в данном случае находится в рамках переходного режима, так как число Рейнольдса находится в пределах: $2\,300 < Re < 10^4$.

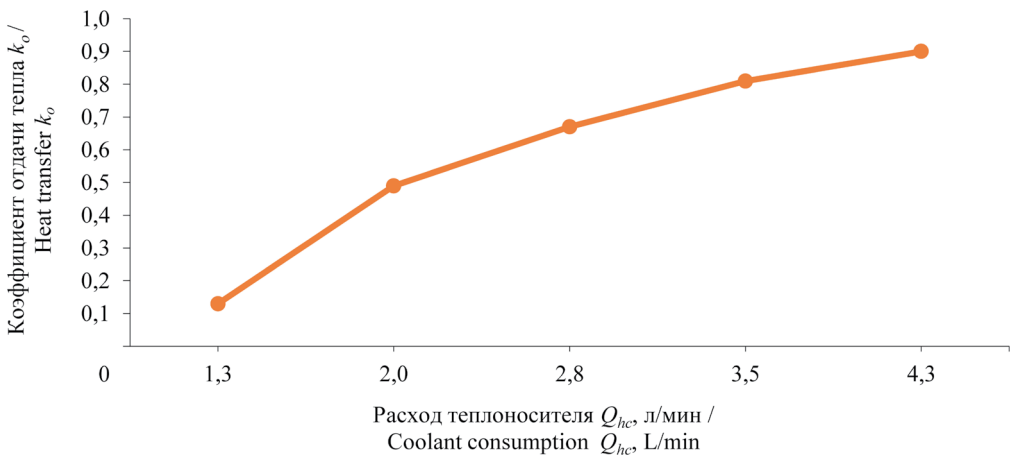
По полученным результатам построены графики зависимости температурных значений от расхода теплоносителя (рис. 5).



Р и с. 5. Зависимость температуры компонентов теплообмена от расхода теплоносителя
 F i g. 5. Dependence of the temperature of heat exchange components on the heat transfer fluid flow rate

Источники: графики для рисунков 5, 6 составлены авторами статьи в программе Microsoft Excel.
 Source: The graphs for figures 5, 6 were compiled by the authors of the article in the Microsoft Excel.

Эффективность исследуемого процесса оценивалась коэффициентом отдачи тепла k_o . Нелинейная зависимость коэффициента от величины расхода теплоносителя показана на рисунке 6.



Р и с. 6. Зависимость коэффициента отдачи тепла от расхода теплоносителя при $Q_{hc} = 3,59$ л/мин
 F i g. 6. Dependence of the heat transfer coefficient on the heat transfer fluid flow rate for $Q_{hc} = 3.59$ L/min

На начальном участке (Q_{hc} в пределах 1,3–2,0 л/мин) наблюдается интенсивный рост k_o . Далее эффективность продолжает расти, но темпы роста замедляются. При достижении значений Q_{hc} около 3,5 л/мин и выше кривая выходит

на стабилизацию, и в дальнейшем наблюдается гораздо менее динамичный рост, повышение расхода теплоносителя не приводит к существенному повышению k_o .

Влияние соотношения расходов на эффективность теплообмена

Для обобщения результатов был введен безразмерный параметр, отражающий динамику теплообменника – соотношение расходов Q_{hc}/Q_p (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Значения коэффициента отдачи тепла в зависимости от соотношения Q_{hc}/Q_p
Values of the heat transfer coefficient depending on the Q_{hc}/Q_p ratio

Вариант / Option	Q_{hc} , л/мин / Q_{hc} , L/min	Q_{hc}/Q_p	k_o , %
$Q_p = 3,50$ л/мин / $Q_p = 3.50$ L/min			
1	0,80	0,23	23,6
2	1,25	0,36	24,4
3	2,00	0,57	28,4
4	2,75	0,78	54,7
5	3,50	1,00	76,8
6	4,25	1,20	78,6
$Q_p = 4,25$ л/мин / $Q_p = 4.25$ L/min			
1	0,80	0,19	12,1
2	1,25	0,29	49,8
3	2,00	0,47	65,1
4	2,75	0,65	75,0
5	3,50	0,82	90,3
6	4,25	1,00	88,6
$Q_p = 5,00$ л/мин / $Q_p = 5.00$ L/min			
1	0,80	0,16	23,5
2	1,25	0,25	27,2
3	2,00	0,40	35,1
4	2,75	0,55	44,6
5	3,50	0,70	53,6
6	4,25	0,85	72,4

В таблице 4 представлена зависимость значений коэффициента отдачи тепла k_o от соотношения расходов для всех проведенных экспериментов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных экспериментальных данных показал устойчивую зависимость: с ростом расхода теплоносителя Q_{hc} при постоянном значении расхода продукта Q_p температура нагреваемого продукта на выходе T_1 повышается. Например, при значении $Q_p = 3,5$ л/мин увеличение Q_{hc} с 0,8 до 3,5 л/мин привело к росту температуры продукта на выходе T_1 с 23,9 до 35,0 °С. При значении $Q_p = 5,0$ л/мин увеличении Q_{hc} с 0,8 до 3,5 л/мин привело к росту температуры нагреваемого продукта на выходе T_1 с 21,6 до 27,9 °С.

Аналогичная тенденция наблюдалась во всех сериях опытов. Это объясняется увеличением количества теплоты, переносимой в единицу времени через стенку пластинчатого теплообменника.

Согласно полученным данным, прирост температуры продукта в проведенных опытах изменялся от 4,7 до 11,0 °С (табл. 2). Рост величины ΔT_p является прямым следствием увеличения эффективности теплопередачи, что и отражается в росте k_o , %.

Разность температур теплоносителя ΔT_{hc} снижается с 20,0 до 15,2 °С, из чего следует, что эффективность использования потенциала теплоносителя снижается при чрезмерном увеличении расхода нагреваемого продукта. Снижение ΔT_{hc} означает, что теплоноситель отдает меньше тепловой энергии в теплообменнике.

По результатам проведенных исследований пластинчатый теплообменник показал возможность функционирования в широком диапазоне эффективности – от 23,5 до 72,4 %. Это означает, что правильная настройка расхода теплоносителя является ключевой для обеспечения его эффективной работы.

Данные эксперимента позволяют выбрать оптимальный режим работы, находящийся в области высоких значений k_o . Например, при расходе продукта 4,25 л/мин значение коэффициента достигало 90 % (табл. 3).

Наглядно подтверждается фундаментальный принцип теплообмена – его эффективность напрямую зависит от режима течения жидкостей, который регулируется их расходами. Так как в данном случае производился нагрев молока, необходимо указать на технологические особенности процесса. Технологические ограничения по характеру течения молока в теплообменнике следующие: необходимость полноты приема тепла (нагрева) – это минимизирует скорость; предотвращение осаждения и пригорания – ограничение по минимуму скорости; предотвращение расслоения молока на фракции – ограничение по максимуму скорости.

Рекомендуемые нормативные значения скорости перемещения молока и молочных продуктов по трубам следующие:

- оптимальный диапазон для цельного молока – 0,25–1,2 м/с;
- критический максимум (для коротких участков) – 1,5 м/с;
- минимальная скорость для предотвращения пригорания осаждения – 0,2 м/с.

Для обезжиренного молока допустимы более высокие скорости: 1–2 м/с. В этом случае риск расслоения меньше из-за сниженного содержания жира.

Технологические последствия превышения скорости перемещения молока ($V > 1,5$ м/с) имеют негативные эффекты. Наблюдается расслоение жировой фазы (образование сливочного слоя, неравномерное распределение жира, ухудшение органолептических свойств); механическая деструкция (разрушение жировых шариков, активация липазы (окислительная порча), повышение кислотности). Кроме того, наблюдается аэрация продукта (насыщение кислородом, развитие окислительных процессов, потеря витаминов).

Если молочное сырье идет на производство структурированных молочных продуктов (сметана, йогурт, кефир), то скорость перемещения на нижнем пределе рекомендуется до 0,3 м/с. Следовательно, режим течения молока – ламинарный – начало переходного. Если сырье идет в дальнейшем на сепарирование с целью

разделения на сливки и обезжиренное молоко, скорость перемещения может быть увеличена до 0,8 м/с без риска потери свойств сырья при транспортировке и качества конечного продукта. Этот режим можно характеризовать как начало турбулентного.

Согласно требованиям международных стандартов IDF (International Dairy Federation) рекомендует максимальную скорость 1,0–1,2 м/с, EHEDG (European Hygienic Engineering) – $\leq 1,2$ м/с для эмульсий. По требованиям национальных стандартов ГОСТ Р 52090-2003⁷, СанПиН 2.3.4.551-96⁸ максимальные значения перемещения молока составляют 1,0 – 1,5 м/с.

На основании расчетов, проведенных по исходным характеристикам продукта, можно выделить зону оптимального соотношения расходов $Q_{hc}/Q_p = 0,75 \dots 0,95$. В этом диапазоне обеспечивается высокий коэффициент отдачи тепла ($k_o > 75\%$), что свидетельствует об эффективном использовании температурного потенциала теплоносителя, а также обеспечивается режим течения продукта, отвечающий условиям IDF, EHEDG, требованиям национальных стандартов. Эксперимент показал, что увеличение расхода продукта выше расхода теплоносителя ведет к снижению эффективности: 90 % при расходе продукта 4,25 л/мин и 72 % при расходе 5,0 л/мин. Работа при меньших соотношениях (например, $Q_{hc}/Q_p < 0,5$) является неэффективной, так как значительная часть тепловой энергии теплоносителя не передается нагреваемой жидкости и возвращается в гелиоколлектор.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований установлены количественные зависимости температуры нагреваемой жидкости на выходе пластинчатого теплообменника от расхода и температуры теплоносителя, поступающего из солнечного коллектора. При постоянной температуре подаваемого на нагрев продукта на входе в указанный диапазон изменения температуры теплоносителя возрастает значение температуры нагретого продукта на выходе из теплообменника. Прослеживается корреляция динамики изменения температуры теплоносителя на входе и выходе из установки с изменением температуры продукта. Максимальное сближение температур нагреваемого продукта и теплоносителя на выходе отражает повышение эффективности теплообмена.

Установлена и проанализирована зависимость коэффициента отдачи тепла k_o для конфигурации системы «гелиоколлектор + пластинчатый теплообменник» от безразмерного параметра – соотношения расходов Q_{hc}/Q_p . Выявлено, что эффективность теплообмена возрастает при увеличении Q_{hc}/Q_p до 0,95, после чего рост замедляется и выходит на плато при $Q_{hc}/Q_p > 0,95$.

Полученные данные дают основание рекомендовать для практического применения оптимальное соотношение расходов теплоносителя и нагреваемой

⁷ ГОСТ Р 52090-2003. Молоко питьевое и напиток молочный. Технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032512> (дата обращения: 04.08.2025).

⁸ СанПиН 2.3.4.551-96. Предприятия пищевой и перерабатывающей промышленности (технологические процессы. Сырье). Производство молока и молочных продуктов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006398> (дата обращения: 04.08.2025).

жидкости в диапазоне $Q_{hc}/Q_p = 0,75...0,95$. Реализация данного режима позволяет достичь коэффициента отдачи тепла k_o свыше 75 % при минимизации энергозатрат на транспортировку теплоносителя. Подтверждена технологическая возможность и эффективность использования солнечной энергии для нагрева воды через пластинчатый теплообменник, что позволяет существенно снизить потребление традиционных энергоносителей. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением влияния типа и геометрии пластин теплообменника на эффективность, а также с интеграцией полученных данных в математическую модель для оптимизации работы всей системы солнечного теплоснабжения в динамических режимах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение в России. *Промышленная энергетика*. 2015;(2):59–62. <https://elibrary.ru/ngcwh>
2. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение в регионах России. *Энергосбережение*. 2014;(6):76–79. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5914 (дата обращения: 17.11.2025).
3. Ильина Т.Н., Саввин Н.Ю., Сотникова О.А., Суслов Д.Ю., Модифицированный пластинчатый теплообменный аппарат. *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2025;(5):35–37. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/modificirovanny-plastinchatyy-teploobmennyy-apparat> (дата обращения: 17.11.2025).
4. Сухоцкий А.Б. Энергетическая эффективность пластинчатых теплообменников систем теплоснабжения. *Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика*. 2024;(1):46–59. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8630&ysclid=mqxmsu32a25926459 (дата обращения: 15.09.2025).
5. Филиппов С.П. Переход к углеродно-нейтральной экономике: возможности и пределы, актуальные задачи. *Теплоэнергетика*. 2024;(1):21–40. <https://doi.org/10.56304/S004036362401003X>
6. Ильин Р.А., Шишкин Н.Д. Комплексная оценка эффективности и создание экспериментальной солнечной водонагревательной установки. *Альтернативная энергетика и экология*. 2015;(21):14–19. <https://doi.org/10.15518/isjaec.2015.21.001>
7. Ковалёв О.П., Ильин А.К., Ильин Р.А. Исследование теплоотдачи при ламинарном течении жидкостей в трубе. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2011;(3):121–125. <https://elibrary.ru/onjarb>
8. Ковалёв О.П., Ильин А.К. Математическая модель управления процессом контактного тепло-массообмена и экспериментальная проверка ее адекватности. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2012;(2):81–84. <https://elibrary.ru/noyhpд>
9. Агафонова И.В., Мурашко М.М. Интенсификация процесса теплообмена в аппаратах пластинчатого типа за счет оптимизации геометрического профиля пластин на примере инновационных решений изготовителя. *Энергосбережение и водоподготовка*. 2023;(2):44–49. URL: https://www.energija.ru/2023_02_contents/ (дата обращения: 08.12.2025).
10. Гербер Ю.Б., Гаврилов А.В., Киян Н.С. Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки. *Инженерные технологии и системы*. 2020;30(2):200–218. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.200-218>
11. Гербер Ю.Б. Определение критерия пастеризации для пластинчатой установки с использованием комплексного энергозамещающего устройства (КЭУ). *Вестник Сумского национального аграрного университета. Серия: экономика и менеджмент*. 2013;(10):110–112. <https://elibrary.ru/smmaur>

12. Никулин Н.Ю. Исследование теплообмена в интенсифицированном кожухотрубном аппарате. *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. 2019;(4):77–82. https://doi.org/10.34031/article_5cb1e65e6c0d28.53980880
13. Семенов И.Е., Платонов Н.И. Исследование теплообмена в контактном аппарате с пленочными форсунками. *Вестник южно-уральского государственного университета. Серия: энергетика*. 2008;(26):10–14. URL: <https://www.powervestniksusu.ru/index.php/PVS/article/view/56> (дата обращения: 08.12.2025).
14. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. Generalised Semi-Empirical Correlation for Heat Transfer in Channels of Plate Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2014;(70):1208–1215. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.038>
15. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., et al. Utilisation of Waste Heat from Exhaust Gases of Drying Process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2016;(10):131–138. <https://doi.org/10.1007/s11705-016-1560-8>
16. Garelli L., Ríos G., Dorella J.J., Storti M.A. Heat Transfer Enhancement in Panel Type Radiators Using Delta-Wing Vortex Generators. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;(137):64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.037>
17. Goedecke R., Scholl S. Modelling and Simulation of a Pillow Plate Thermosiphon Reboiler. *Heat and Mass Transfer*. 2019;(55):95–104. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02543-4>
18. Kong D., Zhang Y., Liu S. Convective Heat Transfer Enhancement by Novel Honeycomb-Core in Sandwich Panel Exchanger Fabricated by Additive Manufacturing. *Applied Thermal Engineering*. 2019;(163):114408. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114408>
19. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Kapustenko P.O. New Developments in Heat Integration and Intensification, Including Total Site, Waste-to-Energy, Supply Chains and Fundamental Concepts. *Applied Thermal Engineering*. 2013;61(1):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.05.003>
20. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O. The Heat and Momentum Transfers Relation in Channels of Plate Heat Exchangers. *Chemical Engineering Transactions*. 2011;(25):357–362. <https://doi.org/10.3303/CET1125060>
21. Tran J.M., Piper M., Kenig E.Y. Single-Phase Flow and Condensation in Pillow-Plate Condensers. In: *Innovative Heat Exchangers*. Cham: Springer International Publishing AG; 2019. 247–266 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71641-1>
22. El-Maktoume D., Chesneau X., Diallo A., Randriamanantany Z.A. Study of Habitat's Thermal Performance Equipped with an Adsorption Cooling Unit by Geothermal Heat Pump. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2021;9(8):26–52. <https://doi.org/10.4236/jpee.2021.98003>

REFERENCES

1. Butuzov V.A. [Solar Heat Supply in the Regions of Russia]. *Energoberezhenie*. 2014;(6):76–79. (In Russ.) Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5914 (accessed 19.04.2025).
2. Butuzov V.A. [Solar Heating in Russia]. *Industrial Power Engineering*. 2015;(2):59–62. (In Russ.) <https://elibrary.ru/tngcwh>
3. Ilyina T.N., Savvin N.Yu., Sotnikova O.A., Suslov D.Yu. Modified Plate Heat Exchanger. *Plumbing, Heating, Air-Conditioning*. 2025;(5):35–37. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.c-o-k.ru/articles/modificirovannyy-plastinchatyy-teploobmennyy-apparat> (accessed 19.04.2025).
4. Suhotskiy A.B. Energy Efficiency of Plate Heat Exchangers in Heating Systems. *AVOK*. 2024;(1):46–59. Available at: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8630&ysclid=mxqtxmsu32a25926459 (accessed 15.09.2025).
5. Filippov S.P. [Transition to a Carbon Neutral Economy: Opportunities and Limits, Current Challenges]. *Thermal Power Engineering*. 2024;(1):21–40. (In Russ.) <https://doi.org/10.56304/S004036362401003X>
6. Ilyin R.A., Shishkin N.D. The Comprehensive Assessment of the Efficiency and the Creation of the Experimental Solar Water Heating Unit. *Alternative Energy and Ecology*. 2015;(21):14–19. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15518/isjaec.2015.21.001>

7. Kovalev O.P., Ilyin A.K., Ilyin R.A. Investigation of Heat Exchange at the Laminar Flow of Liquids in the Pipe. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2011;(3):121–125. <https://elibrary.ru/onjarb>
8. Kovalev O.P., Ilyin A.K. Mathematical Model of Management of the Process of Contact Heat and Mass Exchange and Experimental Check of its Adequacy. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2012;(2):81–84. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/noyhpdp>
9. Agafonova I.V., Murashko M.M. Intensification of the Heat Transfer Process in Plate-Type Apparatuses by Optimizing the Geometric Profile of the Plates on the Example of the Manufacturer's Innovative Solutions. *Ėnergobereženie i vodopodgotovka*. 2023;(2):44–49. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://www.energija.ru/2023_02_contents/ (accessed 08.12.2025).
10. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Kiyani N.S. Modeling the Process of Thermal Treatment of Liquid Products in a Plate Heat Exchanger Using an Integrated Energy-Substituting Installation. *Engineering Technologies and Systems*. 2020;30(2):200–218. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.200-218>
11. Gerber Y.B. Pasteurization Criteriy Determination for Plate Device with the Integrated Equipment. *Journal Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Economics and Management*. 2013;(10):110–112. (In Russ., abstract in Eng.) <https://elibrary.ru/smmaur>
12. Nikulin N. The Study of Heat Transfer in Intensified Shell and Tube Device. *Bulletin of Belgorod State Technological University Named After. V. G. Shukhov*. 2019;(4):77–82. (In Russ., abstract in Eng.) https://doi.org/10.34031/article_5cb1e65e6c0d28.53980880
13. Semenov V.P., Platonov N.I. The Analysis of Heat Transform in a Contact Film Jet Apparatus. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2008;(26):10–14. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: <https://www.powervestniksus.ru/index.php/PVS/article/view/56> (accessed 08.12.2025).
14. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. Generalised Semi-Empirical Correlation for Heat Transfer in Channels of Plate Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*. 2014;(70):1208–1215. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.038>
15. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., et al. Utilisation of Waste Heat from Exhaust Gases of Drying Process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 2016;(10):131–138. <https://doi.org/10.1007/s11705-016-1560-8>
16. Garelli L., Ríos G., Dorella J.J., Storti M.A. Heat Transfer Enhancement in Panel Type Radiators Using Delta-Wing Vortex Generators. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018;(137):64–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.10.037>
17. Goedecke R., Scholl S. Modelling and Simulation of a Pillow Plate Thermosiphon Reboiler. *Heat and Mass Transfer*. 2019;(55):95–104. <https://doi.org/10.1007/s00231-018-02543-4>
18. Kong D., Zhang Y., Liu S. Convective Heat Transfer Enhancement by Novel Honeycomb-Core in Sandwich Panel Exchanger Fabricated by Additive Manufacturing. *Applied Thermal Engineering*. 2019;(163):114408. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114408>
19. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Kapustenko P.O. New Developments in Heat Integration and Intensification, Including Total Site, Waste-to-Energy, Supply Chains and Fundamental Concepts. *Applied Thermal Engineering*. 2013;61(1):1–6. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.05.003>
20. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O. The Heat and Momentum Transfers Relation in Channels of Plate Heat Exchangers. *Chemical Engineering Transactions*. 2011;(25):357–362. <https://doi.org/10.3303/CET1125060>
21. Tran J.M., Piper M., Kenig E.Y. Single-Phase Flow and Condensation in Pillow-Plate Condensers. In: *Innovative Heat Exchangers*. Cham: Springer International Publishing AG; 2019. 247–266 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-71641-1>
22. El-Maktoume D., Chesneau X., Diallo A., Randriamanantany Z.A. Study of Habitat's Thermal Performance Equipped with an Adsorption Cooling Unit by Geothermal Heat Pump. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2021;9(8):26–52. <https://doi.org/10.4236/jpee.2021.98003>

Об авторах:

Гербер Юрий Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Вербицкий Алексей Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского (295007, Российская Федерация, г. Симферополь, просп. Академика Вернадского, д. 4), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8578-1288>, aleksey195883@mail.ru

Вклад авторов:

Ю. Б. Гербер – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования, формулирование идеи исследования, целей и задач, валидация результатов, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

А. П. Вербицкий – осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов, сбор данных, формальный анализ, проверка воспроизводимости результатов экспериментов и исследования в рамках основных или дополнительных задач работы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 29.10.2025; поступила после рецензирования 22.01.2026;
принята к публикации 09.02.2026*

About authors

Yuri B. Gerber, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Technology and Equipment for Production and Processing of Livestock Products, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernansky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, Researcher ID: B-6690-2019, gerber_1961@mail.ru

Alexey P. Verbitsky, Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Technology and Equipment for the Production and Processing of Livestock Products, V. I. Vernadsky Crimean Federal University (4 Vernansky Ave., Simferopol 295007, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8578-1288>, aleksey195883@mail.ru

Authors contribution:

Yu. B. Gerber – oversight and leadership responsibility for the research activity planning and execution, including mentorship external to the core team, ideas; formulation or evolution of overarching research goals and aims, validation, writing – review and editing.

A. P. Verbitsky – conducting a research and investigation process, specifically performing the experiments, evidence collection, formal analysis, verification, whether as a part of the activity or separate, of the overall replication / reproducibility of results / experiments and other research outputs.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 29.10.2025; revised 22.01.2026; accepted 09.02.2026