



## Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки

Ю. Б. Гербер\*, А. В. Гаврилов, Н. С. Киян

*Академия биоресурсов и природопользования  
ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского»  
(пос. Аграрное, г. Симферополь, Россия)*

\*gerber\_1961@mail.ru

*Введение.* В настоящее время актуальным является вопрос снижения затрат электроэнергии в технологиях переработки сельскохозяйственной продукции, в частности молока. В значительной мере эти затраты связаны с реализацией процессов тепловой обработки. Снижения затрат можно добиться несколькими способами, например, разработкой и применением установок, использующих солнечную энергию. В этом случае расход традиционной электрической энергии существенно снижается, но у производителей возникает задача согласования параметров установки с реальными условиями предприятия.

*Материалы и методы.* Анализ потребления энергии в технологиях переработки молока, режимов работы пластинчатого теплообменника, показателей работы гелиоколлекторов. Температура нагрева теплоносителя и продукта определялась с помощью приборного комплекса, позволяющего регистрировать значения температур в восьми различных контрольных точках и передавать полученные сигналы на жесткий диск портативного компьютера. Предложен метод определения параметров установки для подготовки теплоносителя в технологиях переработки молока с использованием комплексной энергозамещающей установки, которая обеспечит снижение затрат электроэнергии от 30 до 70 %.

*Результаты исследования.* Затраты электрической энергии на тепловые процессы могут быть снижены за счет использования энергии Солнца. Для того чтобы решить задачу оптимизации соотношения расхода теплоносителя, площади нагрева в теплообменнике и площади гелиоколлекторов энергозамещающей установки, рекомендовано использование полученных графических зависимостей, а также формул для определения площади гелиоколлекторов.

*Обсуждение и заключение.* Определение площади гелиоколлекторов комплексной энергозамещающей установки для реальных производственных условий возможно с помощью полученной аналитической зависимости, учитывающей взаимосвязь указанного параметра от температурного режима нагрева, площади поверхности нагрева в теплообменнике, массы обрабатываемого молока в единицу времени. Полученные графические зависимости дают возможность определить расход теплоносителя и площадь нагрева для заданных значений температуры нагрева.

**Ключевые слова:** гелиоколлектор, комплексная энергозамещающая установка, теплоноситель, источник энергии, поверхность нагрева, температура пастеризации, молоко, энергосбережение, теплообмен, тепловая мощность, площадь поверхности

© Гербер Ю. Б., Гаврилов А. В., Киян Н. С., 2020



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

*Для цитирования:* Гербер, Ю. Б. Моделирование процесса тепловой обработки жидких продуктов в пластинчатом теплообменнике с использованием комплексной энергозамещающей установки / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, Н. С. Киян. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202002.200-218 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 2. – С. 200–218.

## Modeling the Process of Heat Treatment of Liquid Products in a Plate Heat Exchanger Using an Integrated Energy-Substituting Installation

Yu. B. Gerber\*, A. V. Gavrilov, N. S. Kiyani

*Academy of Bioresources and Environmental Management of Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol, Russia)*

\*gerber\_1961@mail.ru

*Introduction.* Currently, the issue of reducing electrical energy consumption in the technologies of processing agricultural products, in particular, milk is topical. In large part, these costs are associated with the implementation of heat treatment processes. The reduction of electrical energy consumption can be achieved in several ways, one of which is the development and application of solar-powered installations. In this case, the consumption of traditional electrical energy is significantly reduced, but the manufactures have the task of coordinating the installation parameters and the real production conditions of enterprises.

*Materials and Methods.* The study examined energy consumption in milk processing technologies, plate heat exchanger operation modes and heliocollector performance indicators. The heating temperature of the coolant and the product was determined with an instrument complex that allows registering the temperature values in 8 different control points and transmitting the received signals to the personal computer hard disk. The method for defining the parameters of the plant for preparing the coolant in the technologies of milk processing with the use of a complex energy-substituting unit is proposed. The new technique provides a reduction of electric energy consumption from 30 to 70%.

*Results.* The consumption of electrical energy for thermal processes can be reduced by using solar energy. To solve the problem of optimizing the ratio of product consumption, heating area in the heat exchanger, the area of the solar collectors of the energy-substituting installation, it is recommended to use the obtained graphical dependencies and the formula for determining the area of the solar collectors.

*Discussion and Conclusion.* It is possible to determinate the area of solar collectors of complex energy-substituting installation for real production conditions through using the obtained analytical dependence taking into account the dependence the specified parameter on a temperature mode of heating, the area of a surface of heating in the heat exchanger, and weight of milk being processed per unit of time. The obtained graphical dependencies make it possible to determine the product consumption and heating area for the given heating temperature values.

**Keywords:** solar collector, complex energy substitution unit, heat carrier, energy source, heating surface, pasteurization temperature, milk, energy saving, heat exchange, thermal power, surface area

**For citation:** Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Kiyani N.S. Modeling the Process of Heat Treatment of Liquid Products in a Plate Heat Exchanger Using an Integrated Energy-Substituting Installation. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(2):200-218. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202002.200-218>

### Введение

В современных условиях агропромышленного производства все более остро становится вопрос снижения за-

трат дорогостоящих энергоносителей в технологиях переработки сельскохозяйственной продукции, в частности молока. Затраты электроэнергии для

осуществления тепловых процессов существенно повышают себестоимость готовой, в частности молочной, продукции, что снижает ее конкурентоспособность и ведет к наполнению рынка дешевой ненаатуральной продукцией. Снижения затрат можно добиться как технологическими, так и техническими способами, например, разработкой и применением установок, использующих солнечную энергию. В этом случае расход традиционной электрической энергии существенно снижается. Однако в производственных условиях возникает задача определения требуемых параметров энергозамещающей установки с реальными производственными условиями предприятия.

Ранее проведенные исследования позволили сделать вывод о целесообразности использования комплексной энергозамещающей установки (КЭУ) на основе гелиоколлекторов для снижения энергетических затрат при реализации тепловых процессов в технологиях производства молочных продуктов [1–4]. Определена возможность успешного использования КЭУ для таких тепловых процессов, как пастеризация, нагрев, тепловая выдержка при производстве кисломолочной группы продуктов (кефир, творог, сметана и т. п.) [5–8; 10].

Для организации практического применения КЭУ в условиях производства возникла необходимость определения соотношения температуры

теплоносителя  $t_t$  и его расхода  $P_t$ , а также необходимой суммарной площади гелиоколлекторов  $F_k$  для реализации конкретных тепловых процессов с помощью пластинчатой теплообменной установки [9]. В лаборатории кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» был проведен ряд экспериментов по определению параметров предложенной установки. Часть полученных результатов опубликована в открытой печати [10], в данной публикации приведены результаты исследований зависимости динамики нагрева жидкого продукта с помощью комплексной энергозамещающей установки от основных параметров теплообменной установки: расхода теплоносителя  $P_t$  и площади контакта с поверхностью нагрева  $F_p^1$ .

Цель исследования – получить аналитическую, а также построить графоаналитическую модель процесса тепловой обработки жидкого продукта с использованием гелиосистемы, разработать методику определения необходимой площади гелиоколлекторов для нагрева заданного количества продукта в единицу времени до заданной температуры<sup>2</sup>.

### Обзор литературы

Изучением тепловых процессов на протяжении многих лет занимаются ученые всего мира [4–6]. Основы тепло-

<sup>1</sup> Реометрия пищевого сырья и продуктов: справочник / под ред. Ю. А. Мачихина. М.: Агропромиздат, 1990. 270 с.

<sup>2</sup> Ермолаев В. А., Гриценко Д., Юрченко В. В. Анализ влияния способа подвода теплоты на процесс вакуумного обезвоживания молочных продуктов // Инновации в пищевой биотехнологии: Сборник трудов Международного симпозиума / под общ. ред. А. Ю. Просекова. Кемерово: Изд-во ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 2018. С. 290–296; Козлова О. В., Тулгабаева Т. Ч. Совершенствование технологии получения молочно-белковых концентратов, оценка состава и технологических свойств // Инновации в пищевой биотехнологии: Сборник трудов Международного симпозиума / под общ. ред. А. Ю. Просекова. Кемерово: Изд-во ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 2018. С. 33–44; Кригер О. В., Вэй С. Разработка поликомпонентного пробиотика на основе лактобактерий, выделенных из национальных кисломолочных продуктов // Инновации в пищевой биотехнологии: Сборник трудов Международного симпозиума / под общ. ред. А. Ю. Просекова. Кемерово: Изд-во ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 2018. С. 44–48.

обмена и прикладные задачи по тепловой обработке сельскохозяйственного сырья отражены в работах ряда исследователей [11; 12]. Вопросами оптимизации энергетических затрат в технологиях переработки сельскохозяйственной продукции занимались ученые как в нашей стране, так и за рубежом. Решение поставленной задачи предлагается в следующих основных направлениях: оптимизация технологии с целью сведения к минимуму повторности тепловой обработки [13–15]; совершенствование конструкции оборудования [16–18]; внедрение технических средств на основе использования возобновляемых источников энергии<sup>3</sup> [19; 20]; комплексное использование традиционных и возобновляемых источников энергии<sup>4</sup> [21; 22]. Предлагаемые решения технологических приемов оптимизации энергозатрат способствуют частичному решению проблемы, однако существенно повлиять на снижение затрат дорогих традиционных энергоносителей не могут [23–25]. Совершенствование конструкции оборудования при прочих положительных эффектах (повышение производительности, снижение затрат труда) также не оказывает значительно влияния на решение указанной задачи [26–28].

Обзор литературных источников демонстрирует большой интерес ис-

следователей к использованию возобновляемых источников энергии в технологических процессах, в частности аграрном производстве<sup>5</sup> [29; 30].

Природно-климатические условия Крыма и юга России в значительной степени благоприятствуют развитию солнечной энергетики, поэтому ряд исследований посвящен этому вопросу применительно к Крымскому региону [31–33]. Зарубежный опыт в указанной области отражен в публикациях ученых Дании, Германии, Италии и других стран [34–37].

Совершенствованию оборудования для использования солнечной энергии и повышению коэффициента их полезного действия уделяется большое внимание в последние годы. Материал изготовления и конструктивные особенности солнечных батарей за последние пять лет претерпели серьезные изменения и позволяют ставить вопрос о широком их применении в технологических процессах агропромышленного производства<sup>6</sup> [38]. Комплексное использование как традиционных, так и возобновляемых источников энергии рассмотрено в ряде работ<sup>7</sup>.

Проведенный обзор литературы по предлагаемой теме научных исследований дает возможность сделать заключение об экономической целесообразности применения в технологиях

<sup>3</sup> **Тлеков У. Г., Садыгова Л. А.** Развитие альтернативных источников энергии в помощь решению проблем энергетики в РК // Актуальные проблемы энергетики АПКЖ: материалы VIII международной научно-практической конференции. 2017. С. 261–264.

<sup>4</sup> **Васильева Г. А., Троянова Е. Н.** Проблемы развития альтернативных источников энергетики России // Современное инновационное общество: динамика становления, приоритеты развития, модернизация: экономические, социальные, философские, правовые, общенаучные аспекты: материалы Международной научно-практической конференции. 2015. С. 28–31.

<sup>5</sup> **Gabor D., Colombo U., King A. S.** Beyond the Age of Waste: A Report to the Club of Rome. 2<sup>nd</sup> Ed. 2016. 258 p. URL: <https://www.elsevier.com/books/beyond-the-age-of-waste/gabor/978-0-08-027303-7> (дата обращения: 30.03.2020).

<sup>6</sup> **Sabarez H. T.** Thermal Drying of Foods. In: Fruit Preservation. Food Engineering Series / A. Rosenthal [et al.]. New York: Springer, 2018. Pp. 181–210. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-3311-2\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4939-3311-2_7) (дата обращения: 30.03.2020).

<sup>7</sup> Альтернативные источники энергии [Электронный ресурс]. URL: <http://e-koncept.ru/2015/65324.htm> (дата обращения: 30.03.2020); Нетрадиционные возобновляемые источники энергии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bibliotekar.ru/alterEnergy/26.htm> (дата обращения: 30.03.2020).

переработки молока нетрадиционных источников энергии, в данном случае энергии Солнца, для сокращения затрат электрической энергии на нагрев молока [5; 12]. Большую часть затрат энергии в тепловых процессах переработки молока занимает пастеризация и нагрев (в том числе предварительный) на различных технологических этапах переработки<sup>8</sup> [13–16]. Разница температур при нагреве продукта до необходимого значения обычно составляет 65...70 °С. Учитывая, что на нагрев одной тонны молока всего на один градус требуется около 1,1 кВт электроэнергии, для предприятия производственной мощностью в несколько десятков тонн несложно определить суммарные энергетические затраты, которые в конечном счете закладываются в себестоимость готового продукта<sup>9</sup> [17–19].

Ранее проведенные исследования показывают, что основной причиной больших энергозатрат в технологиях переработки молока и производства молочных продуктов является температурный режим и объем теплоносителя (воды) [3]. Предварительный нагрев теплоносителя при помощи гелиоустройства и подача к тепловому аппарату, который установлен в технологической линии, дают возможность снизить расход электрической энергии различных традиционных энергоносителей и позволяют сделать производство по переработке молока менее энергозатратным [2; 8].

Выполненные на кафедре технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» лабораторные и производственные эксперименты по применению КЭУ в южных регионах

страны для подогрева теплоносителя показали [1; 3], что КЭУ позволит снизить указанный выше интервал: при неблагоприятных погодных условиях – до 45–50 °С; при благоприятных погодных условиях (ясная солнечная погода) – до 25–30 °С [8–10].

Наиболее перспективный вариант применения энергии Солнца для обеспечения теплом технологических линий средней производительности – это система, состоящая из комбинации солнечных коллекторов, теплового котла, бака-аккумулятора [8; 14].

Основными конструктивными элементами предложенной КЭУ являются трубчатый гелиоприемник (гелиоколлектор) и бак-аккумулятор, установленные на несущей раме. Также установка имеет систему водоснабжения с теплоизоляцией и термоизмерительный комплекс. Экспериментальная КЭУ работает следующим образом. Циркуляция теплоносителя осуществляется за счет изменения его плотности по мере нагревания солнечными лучами. Нагретый теплоноситель, поступая в верхнюю часть бака-аккумулятора, вытесняет из нижней части прохладный теплоноситель. Вытесненный теплоноситель при этом перетекает по нижней части циркуляционного трубопровода в нижнюю часть гелиоколлектора, заполняя пространство. Забор нагретого теплоносителя (воды) из бака-аккумулятора осуществляется из верхней части.

Практическое применение КЭУ в условиях производства затрудняет неопределенность соотношения температуры теплоносителя  $t_t$  и его расхода  $P_t$ , а также необходимой суммарной площади гелиоколлекторов  $F_k$  для реализации конкретных тепловых процессов с помощью пластинчатой теплообмен-

<sup>8</sup> **Тлеков У. Г., Садыгова Л. А.** Развитие альтернативных источников энергии в помощь решению проблем энергетики в РК.

<sup>9</sup> **Васильева Г. А., Троянова Е. Н.** Проблемы развития альтернативных источников энергетики России.

ной установки. Данное соотношение по сути определяет конструктивно-режимные параметры установки для конкретных тепловых режимов, без которых нет возможности дать полноценные рекомендации производству. Обзор и анализ исследований, проведенных ранее учеными в вопросах использования теплоносителя, нагретого с помощью гелиоустановок, показал, что методика такого расчета на сегодняшний день отсутствует.

### Материалы и методы

Как указано выше, на кафедре технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» в результате проведенных многолетних исследований накоплен большой научный и производственный опыт использования КЭУ в технологиях переработки молока, послуживший основой для планирования и проведения описанных ниже экспериментов.

*Определение зависимости температуры нагрева жидкости  $t_T$  в пластинчатом теплообменнике от расхода теплоносителя  $P_T$*

Для замера температуры нагреваемой воды в пастеризационной установке использовались тарированные термопары ТХА типа К измерительного восьмиканального блока «Тэра Д-ИТ-8ТП-Э3а-PST-2U», собранного по схеме, приведенной на рисунке 1.

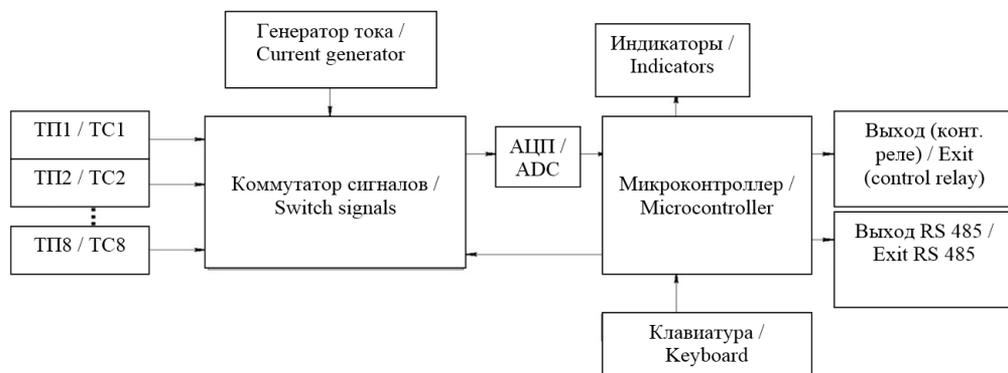
Погрешность температурного показателя по паспорту у прибора «Тэра» на термопаре  $+(-)0,03$  °С.

Значения с измерительного прибора «Тэра Д-ИТ-8ТП-Э3а-PST-2U» записывались в программе Technolog Soft.

На пластинчатый пастеризатор были установлены теплоизолированные термодатчики (рис. 2).

Для изменения расхода регулировалась подача молока в секции пастеризатора при помощи регулировочного вентиля, изменяя угол поворота. После чего на выходе замерялся расход молока.

Расход молока вычисляли следующим образом: каждый раз после того, как регулировочный вентиль устанавливался на 20°, 40°, 60°, 80° поворота, и пастеризационная установка выводилась на рабочий режим, секундомером замерялось время заполнения емкости (бидон 25 л), затем емкость взвешивалась и рассчитывался объем моло-



Р и с. 1. Обобщенная функциональная схема подключения измерительного восьмиканального блока «Тэра Д-ИТ-8ТП-Э3а-PST-2U»

F i g. 1. Generalized functional diagram of the connection of the measuring eight-channel unit Tera D-IT-8TP-E3a-RST-2U



Р и с. 2. Пастеризатор с установленными термопарами  
F i g. 2. Pasteurizer with installed thermocouples

ка ( $V$ , л). После чего для каждого угла поворота рассчитывался расход  $P_t$ , л/мин:

$$P_t = \frac{V}{T},$$

где  $V$  – объем молока, л;  $T$  – время, в течение которого заполнилась емкость, мин.

*Определение зависимости температуры нагрева жидкости  $t$  от площади теплообменных пластин  $F_p$*

В данном эксперименте площадь нагрева изменялась количеством установленных пластин: с рабочей установки демонтировалась часть пластин в секции пастеризации, при этом общее их количество в экспериментах составило 6, 9, 13 (рис. 3). В процессе каждого опыта пастеризационная установка выводилась на рабочий режим с заданным количеством включенных электрических нагревателей (во всех опытах число работающих нагревателей было одинаковым).

В этом режиме установка работала фиксированное время, а затем измерялась температура пастеризуемого молока.

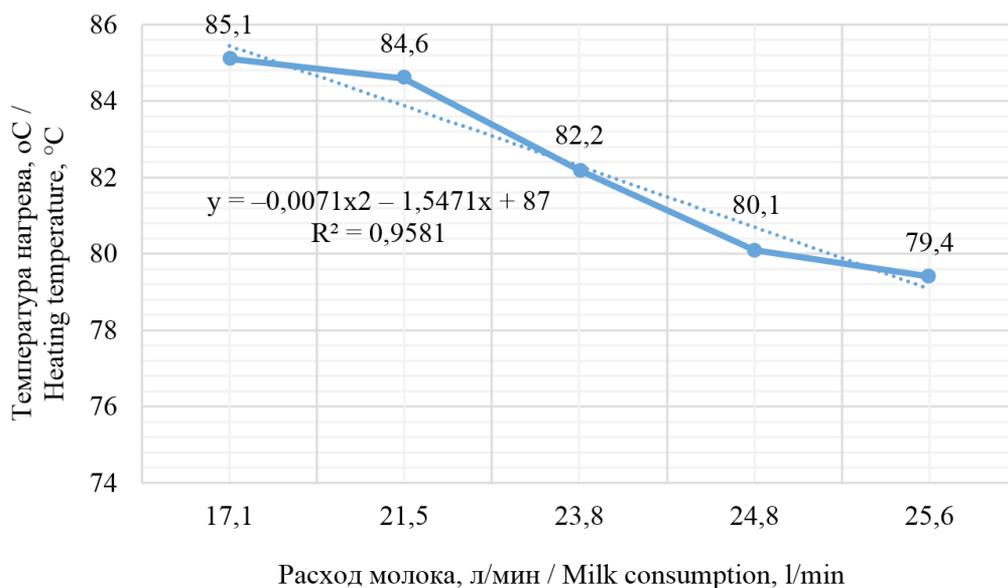
#### **Результаты исследования**

Согласно данным, полученным в результате первого эксперимента, построен график (рис. 4). Из графика видно, что увеличение расхода продукта ведет к снижению нагрева молока при прочих равных условиях, что вполне объяснимо законами термодинамики.

Динамика изменения более явно наблюдается в диапазоне значений от 21,5 до 24,5 л/мин, в дальнейшем динамика снижения замедляется. Требуемая температура пастеризации (82 °С) достигается при расходе молока 23,8 л/мин. Данный расход можно считать оптимальным для пастеризации молока при фиксированной площади теплообмена установки 2,23 м<sup>2</sup> (вариант включения всех пластин секции). Указанная температура соответствует оптимальной температуре пастеризации, например, при производ-



Р и с. 3. Пастеризатор с комплектом теплообменных пластин при проведении эксперимента  
F i g. 3. Pasteurizer with a set of heat transfer plates during the experiment



Р и с. 4. График зависимости температуры нагрева  $t$  от расхода  $P_t$   
F i g. 4. Graph of the dependence of heating temperature  $t$  on the flow  $P_t$

стве функциональных кисломолочных продуктов.

Снижение расхода до отметки менее 21,5 л/мин незначительно влияет на динамику изменения температуры нагрева; аналогичная зависимость наблюдается и в области значений расхода более 25 л/мин. Учитывая нерациональность работы установки с низкой производительностью и сложностью нагрева до заданной температуры при очень высокой производительности процесса, приходим к ограничению диапазона значений расхода продукта. Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности работы пластинчатой установки данного типоразмера ( $F_p = 2,23 \text{ м}^2$ ) в диапазоне значений расхода продукта 21,5–24,5 л/мин. Полученная зависимость также даст возможность в дальнейшем обосновать методику определения параметров теплообменной установки.

Согласно данным, полученным в ходе второго эксперимента, построен график (рис. 5).

Основная задача теплообменной установки – нагрев жидкости до задан-

ной по технологии температуры за короткий период с минимальными энергетическими затратами. Априорные данные, а также проведенный эксперимент показывают зависимость температуры жидкости от указанных параметров – расхода и площади нагрева.

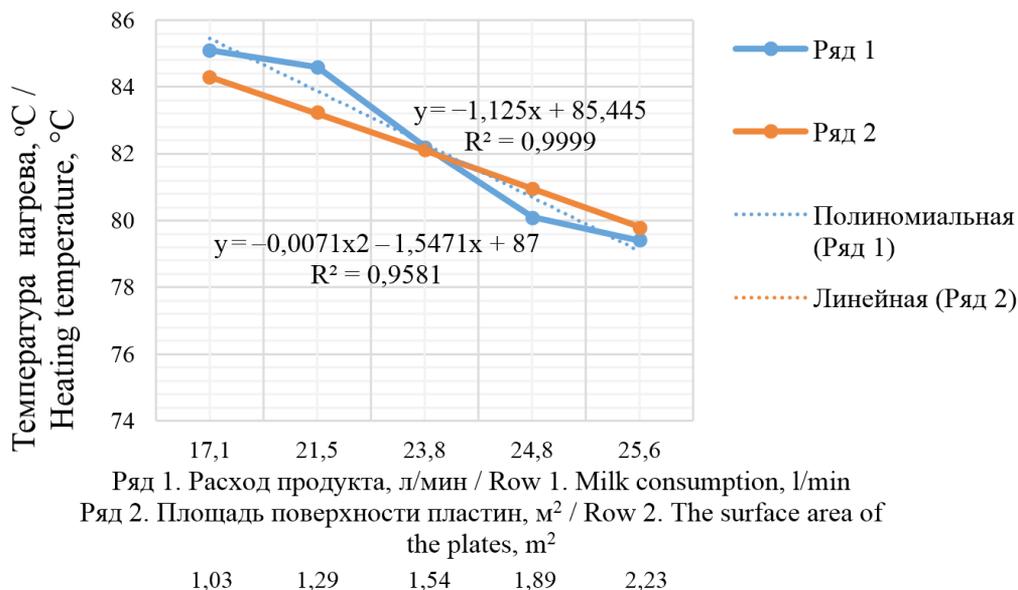
Для решения поставленной задачи полученные зависимости были совмещены на одном графике, на оси ординат которого расположены значения температуры нагрева.

Воспользуемся полученными совмещенными графиками для решения задачи, поставленной в начале, – определения конструктивно-режимных параметров теплообменника с использованием КЭУ.

Для этого проводим на совмещенном графике линию, параллельную оси абсцисс, через точку, соответствующую температуре обработки продукта (согласно государственному стандарту или техническим условиям), до пересечения с графиками (рис. 6). Получим две точки пересечения. Опустив из точки пересечения вертикаль на ось



Р и с. 5. График зависимости температуры пастеризации от площади теплообменных пластин  
F i g. 5. Graph of pasteurization temperature dependence on heat-exchange plate area



Р и с. 6. Совмещенные графические зависимости температуры нагрева продукта от расхода продукта  $P_T$  и площади поверхности теплообмена  $F_p$

Fig. 6. Combined graphical dependencies of the product heating temperature on the flow rate of the product  $P_T$  and the surface area of heat transfer  $F_p$

абсцисс, найдем значения параметра расхода  $P_T$  и площади поверхности нагрева  $F_p$ , соответствующие заданной температуре.

Например, для обеспечения температуры обработки продукта  $80\text{ }^\circ\text{C}$  расход должен составлять  $24,9\text{ л/мин}$ , площадь контакта теплообмена  $2,12\text{ м}^2$ . Таким образом, определены основные параметры работы теплообменной установки, методика позволяет определить указанные режимно-конструктивные параметры для любой температурной точки в диапазоне тепловых воздействий на молоко (нагрев, заквашивание, пастеризация).

При использовании в системе работы пластинчатого теплообменника комплексной энергозамещающей установки на основе гелиоколлекторов в методике определения конструктивно-режимных параметров возникает необходимость определения их суммарной площади. Для этого определим

суммарную тепловую мощность, создаваемую гелиосистемой.

Мощность тепловой энергии, которая генерируется поверхностью солнечного коллектора и отводится путем естественной конвекции, определяется по формуле:

$$Q_k = F_R (a \cdot \tau) \cdot v_{\text{от}} \times \times F_k \left[ 1 - \frac{U \cdot (T_{\text{вх}} - T_0)}{(a \cdot \tau) \cdot F_k} \right] \cdot n_k, \quad (1)$$

где  $F_k$  – площадь поглощающей поверхности гелиоколлектора;  $a \cdot \tau$  – поглощающая способность гелиоколлектора (приведенная величина);  $F_R$  – коэффициент отвода теплоты;  $v_{\text{от}}$  – относительная скорость (продукта и теплоносителя) в пластинчатом теплообменнике;  $v_{\text{от}} = [V_{\text{пл}}] + V_T$ ;  $v_T$  – скорость движения теплоносителя;  $v_{\text{пл}}$  – скорость продукта в секции теплообменника;  $T_0$  и  $T_{\text{вх}}$  – тем-

пературы окружающей среды и теплоносителя на входе в коллектор;  $U$  – коэффициент тепловых потерь коллектора (приведенная величина), Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $n_k$  – количество секций коллекторов в комплексной энергозамещающей установке.

Учитывая, что не вся энергия, отводимая от коллекторов КЭУ, будет передана продукту, необходимо найти зависимость для количества теплоты, получаемой продуктом в секции пластинчатого теплообменника. Величина производительности работы секции зависит от кинематической вязкости молока и от его температуры. Для лучшего восприятия аналитической модели введем следующие обозначения:

$$U \cdot (T_{\text{вх}} - T_0) = A_{pl};$$

$$(a \cdot \tau) \cdot F_k = B_{pl}.$$

Учитывая это:

$$Q_k = F_R \cdot B_{pl} \cdot v_{\text{от}} \cdot \left[ 1 - \frac{A_{pl}}{B_{pl}} \right].$$

После раскрытия скобок:

$$Q_k = F_R \cdot B_{pl} \cdot v_{\text{от}} - F_R \cdot A_{pl} \cdot v_{\text{от}}. \quad (2)$$

В полученном выражении общий множитель вынесем за скобки:

$$Q_k = v_{\text{от}} \cdot F_R \cdot (B_{pl} - A_{pl}). \quad (3)$$

Полученная формула применима для определения величины тепловой энергии, которая передается в какой-либо из секций установки нагреваемому объекту. Из формулы видно, что количество передаваемой теплоты пропорционально коэффициенту отвода теплоты, относительной скорости перемещения теплоносителя и потребителя тепла в секции, а также разности температур окружающего воздуха и теплоносителя.

Учитывая полученное равенство, найдем выражение для определения

площади гелиоколлекторов комплексной энергозамещающей установки в зависимости от основных режимно-конструктивных параметров процесса.

Для этого воспользуемся уравнением теплопередачи, которое объединяет количество теплоты, необходимое для нагрева продукта от начальной до конечной температуры, при которой осуществляется тепловой процесс (например, пастеризация), а также количество теплоты, которое способна сообщить поверхность теплопередачи с конкретными характеристиками.

$$F_p \cdot k_p \cdot \Delta t = E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h), \quad (4)$$

где  $F_p$  – общая площадь нагрева секции, м<sup>2</sup>;  $E$  – коэффициент регенерации, отражающий степень отбора тепла, направляемого на повторное использование;  $c$  – теплоемкость продукта, Дж/кг·К;  $t_n$  – величина температуры пастеризации, °С;  $t_h$  – начальная температура продукта, °С.

Фактически данная формула (4) может служить для решения ряда задач относительно всех как режимных, так и конструктивных параметров нагрева в теплообменнике. Найдем частный случай определения площади контакта с поверхностью нагрева  $F_p$ :

$$F_p = \frac{E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h)}{k_p \cdot \Delta t \cdot \tau}, \quad (5)$$

где  $G$  – масса продукта, кг;  $k_p$  – коэффициент теплопередачи;  $\Delta t$  – разность температур теплоносителя и продукта, °С;  $t$  – время контакта продукта с поверхностью теплообмена.

Приравняем выражения (3) и (4):

$$v_{\text{от}} \cdot F_R \cdot (B_{pl} - A_{pl}) \cdot U_{\text{тр}} = F_p \cdot k_p \cdot \Delta t \cdot \tau, \quad (6)$$

где  $U_{\text{тр}}$  – приведенный коэффициент тепловых потерь при транспортировке теплоносителя от гелиоустановки к теплообменнику.

*Процессы и машины агроинженерных систем*

Опыт работы модуля КЭУ в практических условиях цеха по переработке молока Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» показал высокую степень зависимости тепловых потерь от материала изготовления и состояния теплоизоляции трубопровода подачи теплоносителя.

Учитывая выражение для определения площади поверхности нагрева, полученное ранее (5), преобразуем выражение (6):

$$\begin{aligned} v_{от} \cdot F_R \cdot (B_{pl} - A_{pl}) \cdot U_{тр} = \\ = \frac{E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h)}{k_p \cdot \Delta t \cdot \tau} \cdot k_p \cdot \Delta t \cdot \tau. \end{aligned} \quad (7)$$

Учитывая общее уравнение теплопередачи (4), преобразуем правую часть формулы (7):

$$v_{от} \cdot F_R \cdot (B_{pl} - A_{pl}) \cdot U_{тр} = E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h).$$

Из полученного равенства выразим  $B_{pl}$ :

$$B_{pl} = \frac{E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h)}{v_{от} \cdot F_R \cdot U_{тр}} + A_{pl}.$$

Принимая во внимание введенное ранее обозначение  $B_{pl} = (a \cdot \tau) \cdot F_k$ , решим уравнение относительно площади гелиоколлекторов:

$$F_k = \frac{E \cdot G \cdot c \cdot (t_n - t_h)}{v_{от} \cdot F_R \cdot U_{тр} \cdot a \cdot \tau} + \frac{A_{pl}}{a \cdot \tau}. \quad (8)$$

Полученное выражение позволяет сделать следующие выводы:

- с повышением величины  $F_R$  снижается значение первого слагаемого уравнения (8), следовательно уменьшается величина  $F_k$ ;

- с увеличением показателя поглощающей способности гелиоколлектора  $a \cdot \tau$  снижается необходимая суммарная площадь гелиоколлекторов  $F_k$ ;

- уменьшение величины  $F_R$  ведет к необходимости повышения  $F_k$ .

### Обсуждение и заключение

Проведенные исследования позволили получить графическую модель зависимости температуры нагрева в пластинчатой установке от расхода теплоносителя  $P_T$  и площади поверхности теплообмена  $F_p$  в диапазоне температур тепловой обработки молока. Данные закономерности позволяют определить указанные параметры теплообменной установки для конкретного требуемого значения температуры обработки в технологии производства заданного молочного продукта. Практическая значимость указанной модели заключается в том, что появляется возможность конкретизировать значения параметров в сравнении с широким диапазоном значений, использовавшихся ранее, что в конечном итоге оптимизирует энергетические затраты на тепловую обработку.

В результате проведенных аналитических исследований получена модель для определения площади гелиоколлекторов комплексной энергозамещающей установки, работающей в системе пластинчатого теплообменника тепловой обработки молока. Полученная формула учитывает зависимость указанного параметра от температурного режима нагрева, площади поверхности нагрева в теплообменнике, массы обрабатываемого молока в единицу времени. Таким образом, полученные результаты позволяют производить расчет необходимых режимных и конструктивных параметров теплообменной установки, включающей устройство для использования солнечной энергии, минимизировать затраты электрической энергии.

Дальнейшая работа в этом направлении позволит расширить диапазон применения возобновляемых источников энергии в технологиях переработки молока, сделать процесс менее энергозатратным, а также снизить себестоимость производимой продукции.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Гербер, Ю. Б.** Использование комплексного энергозамещающего устройства для переработки молока / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, А. П. Вербицкий [и др.] // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2016. – № 7 (170). – С. 52–59. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-kompleksnogo-energozameschayuschego-ustroystva-dlya-pererabotki-moloka/viewer> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
2. **Гербер, Ю. Б.** Определение параметров секции предварительного подогрева пастеризатора с использованием КЭУ / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2016. – № 5 (168). – С. 56–61. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-eksksii-predvaritelnogo-podogreva-pasterizatora-s-ispolzovaniem-keu> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
3. **Гербер, Ю. Б.** Использование комплексного энергозамещающего устройства в технологии производства функционального продукта «Ацидолакт» / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, Н. С. Киян // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2016. – № 6 (169). – С. 60–66. – URL: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/346730/#1> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
4. **Ботвинникова, В. В.** Формирование потребительских свойств кисломолочных напитков на основе эффектов ультразвука / В. В. Ботвинникова, О. Н. Красуля. – DOI 10.14529/food150405 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: пищевые и биотехнологии. – 2015. – Т. 3, № 4. – С. 30–40. – URL: <https://vestnik.susu.ru/food/article/view/4457> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
5. **Доровских, В. И.** Обоснование критериев оценки эффективности использования оборудования для первичной обработки молока / В. И. Доровских, Д. В. Доровских, С. Ф. Х. Альлами // Наука в центральной России. – 2016. – № 5 (23). – С. 62–69. – URL: <https://clck.ru/MjF8t> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
6. **Пасько, О. В.** Применение принципов ХАССП при разработке технологии творожного биопродукта / О. В. Пасько, Л. Г. Германская, О. В. Пензина // Аграрный вестник Урала. – 2014. – № 8 (126). – С. 34–37. – URL: <http://avu.usaca.ru/ru/issues/67/articles/1700> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
7. **Гербер, Ю. Б.** К вопросу проектирования современного молокоперерабатывающего предприятия / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. – 2018. – № 15 (178). – С. 97–106. – Рез. англ.
8. **Гербер, Ю. Б.** Исследование предварительного подогрева теплоносителя комплексным энергозамещающим устройством в тепловых процессах переработки молока / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, А. П. Вербицкий. – DOI 10.21603/2074-9414-2018-3-124-132 // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – Т. 48, № 3. – С. 124–132. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/330879456\\_Thermal\\_Treatment\\_in\\_Milk\\_Processing\\_Using\\_a\\_Complex\\_Energy-Substitution\\_Equipment\\_during\\_Preliminary\\_Water\\_Heating](https://www.researchgate.net/publication/330879456_Thermal_Treatment_in_Milk_Processing_Using_a_Complex_Energy-Substitution_Equipment_during_Preliminary_Water_Heating) (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
9. **Гербер, Ю. Б.** Энергетические показатели работы термосмешивающей системы в линии переработки молока с использованием комплексной энергозамещающей установки / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов, Н. С. Киян // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – № 6 (88). – С. 65–69. – URL: <https://clck.ru/MjFzi> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
10. **Гербер, Ю. Б.** Обоснование параметров механической обработки молока при производстве кисломолочных продуктов / Ю. Б. Гербер, А. В. Гаврилов. – DOI 10.21603/2074-9414-2019-3-375-382 // Техника и технология пищевых производств. – 2019. – Т. 49, № 3. – С. 375–382. – URL: <http://fptt.ru/?page=archive&jrn=54&article=4> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

11. **Кригер, О. В.** Разработка приемов длительного сохранения свойств молочнокислых микроорганизмов / О. В. Кригер, С. Ю. Носкова. – DOI 10.21603/2074-9414-2018-4-30-38 // Техника и технология пищевых производств. – 2018. – № 4. – С. 30–38. – URL: <http://fptt.ru/?page=archive&jm=51&article=4> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
12. **Карпович, Э. В.** Перспективные направления использования солнечных батарей / Э. В. Карпович // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2011. – № 4. – С. 34–36. – URL: <http://www.cnsnb.ru/cnsnb/newpost/arttrn.asp?val=1182693> (дата обращения: 30.03.2020).
13. **Бобыль, А. В.** Источники развития альтернативной энергетики / А. В. Бобыль, А. Г. Забродский, В. Г. Малышкин [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2017. – Вып. 92. – С. 31–35. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/istochniki-razvitiya-alternativnoy-energetiki> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
14. **Бровцин, В. Н.** Оптимизация параметров солнечной водонагревательной установки методом вычислительного эксперимента / В. Н. Бровцин, А. Ф. Эрк // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2013. – № 84. – С. 112–125. – URL: <https://docplayer.ru/42197151-V-n-brovcin-d-r-tehn-nauk-a-f-erk-kand-tehn-nauk.html> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
15. **Бровцин, В. Н.** Обоснование оптимальных параметров преобразователей энергии Солнца и ветра в электрическую / В. Н. Бровцин, А. Ф. Эрк // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2014. – № 85. – С. 72–84. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-optimalnyh-parametrov-preobrazovately-energii-solntsa-i-vestra-v-elektricheskuyu> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
16. **Судаченко, В. Н.** Обоснование критерия экономической эффективности совместного использования традиционных и возобновляемых энергоисточников / В. Н. Судаченко, А. Ф. Эрк, Е. В. Тимофеев // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2017. – № 92. – С. 35–43. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kriteriya-ekonomicheskoy-effektivnosti-sovmestnogo-ispolzovaniya-traditsionnyh-i-vozobnovlyаемых-energoistochnikov> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
17. **Марченко, О. В.** Системные исследования эффективности возобновляемых источников энергии / О. В. Марченко, С. В. Соломин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 11. – С. 12–17.
18. **Пермяков, Э. Н.** Нетрадиционные возобновляемые источники энергии: состояние и перспективы освоения / Э. Н. Пермяков // Энергетическое строительство. – 2011. – № 12. – С. 15–21.
19. **Караева, Н. С.** Развитие альтернативных источников энергии в решении проблем энергетики / Н. С. Караева, М. А. Кариев // Вестник Кыргызского национального аграрного университета им. К. И. Скрябина. – 2014. – № 2 (31). – С. 331–335.
20. **Алексенко, С. В.** Нетрадиционная энергетика и энергоресурсосбережение / С. В. Алексенко // Инновации. Технология. Решения. – 2006. – № 3. – С. 8–41. – URL: <http://masters.donntu.org/2011/etf/korovin/library/article3/article3.htm> (дата обращения: 30.03.2020).
21. **Милованов, И. В.** Анализ современного состояния развития энергетики при использовании альтернативных источников энергии / И. В. Милованов // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 44. – С. 278–281. – URL: <https://kgau-works.kubsau.ru/issue/2013-44> (дата обращения: 30.03.2020).
22. **Свалова, В. Б.** Альтернативная энергетика: проблемы и перспективы / В. Б. Свалова // Мониторинг. Наука и технологии. – 2015. – № 3 (24). – С. 82–97. – URL: <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2015-3-09> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.
23. **Шевцова, С. В.** Анализ зарубежного опыта использования альтернативных видов энергии / С. В. Шевцова, Д. С. Жолудь // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2010. – № 6 (76). – С. 49–53. – URL: <https://clck.ru/MjNor> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

24. **Мучинская, А. В.** Солнечная энергия в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей / А. В. Мучинская, А. Н. Синькевич // Сельскохозяйственные науки и агропромышленный комплекс на рубеже веков. – 2014. – № 8. – С. 158–161. – URL: <https://studylib.ru/doc/2102839/solnechnaya-e-nergiya-v-sisteme-e-nergosnabzheniya> (дата обращения: 30.03.2020).

25. **Сафонов, В. А.** Тенденции, состояние, возможности, перспективы развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в республике Крым и г. Севастополь / В. А. Сафонов, А. А. Восканян // Энергетические установки и технологии. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 55–64. – Рез. англ.

26. **Сабанчин, В. Р.** Солнце как альтернатива традиционному топливу / В. Р. Сабанчин, А. Ф. Занина // Вестник УГУЭС. Наука. Образование. Экономика. Серия: Экономика. – 2014. – № 1 (7). – С. 201–204. – URL: <http://www.ugues.ru/files/Вестник/Vipusk-7-2014.pdf> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

27. **Энговатова, В. В.** Перспективные направления в сфере энергосбережения и электроснабжения Крыма / В. В. Энговатова, В. И. Демин, Е. И. Овчинникова [и др.] // Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 4. – С. 301–312. – URL: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0011/0392.pdf> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

28. **Сухоручкина, Т. Ю.** Проблемы развития возобновляемых источников энергетики в России / Т. Ю. Сухоручкина, О. С. Аграшенко // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2016. – № 2 (14). – С. 40–43. – URL: <https://clck.ru/MjQ8w> (дата обращения: 30.03.2020). – Рез. англ.

29. **Тепе, К.** Determination of Basic Parameters of Solar Panels / К. Тепе, К. Agbenotowossi, G. Djeteli [et al.] // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2010. – Issue 2 (82). – С. 22–27. – URL: <http://naukarus.com/determination-of-basic-parameters-of-solar-panels> (дата обращения: 30.03.2020).

30. **Gladyshev, P. P.** Thin Film Solar Cells Based on CdTe and Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) Compounds / P. P. Gladyshev, S. V. Filin, A. I. Puzynin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series: 3<sup>rd</sup> Nanotechnology International Forum (1–3 November, 2010). – Moscow, 2010. – Vol. 291.

31. **Clapp, J.** The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems / J. Clapp, P. Newell, Z. W. Brent. – DOI 10.1080/03066150.2017.1381602 // The Journal of Peasant Studies – 2018. – Vol. 45, Issue 1. – Pp. 80–88. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03066150.2017.1381602?journalCode=fjps20> (дата обращения: 30.03.2020).

32. **Govindan, K.** Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: A Conceptual Framework / К. Govindan. – DOI 10.1016/j.ijpe.2017.03.003 // International Journal of Production Economics. – 2018. – Vol. 195. – Pp. 419–431. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925527317300610?via%3Dihub> (дата обращения: 30.03.2020).

33. **Cai, X.** Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus – Opportunities for Water Resources Research / X. Cai, K. Wallington, M. Shafiee-Jood [et al.]. – DOI 10.1016/j.advwatres.2017.11.014 // Advances in Water Resources. – 2018. – Vol. 111. – Pp. 259–273. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170817304475?via%3Dihub> (дата обращения: 30.03.2020).

34. **Prosekov, A. Y.** Food Security: The Challenge of the Present / A. Y. Prosekov, S. A. Ivanova. – DOI 10.1016/j.geoforum.2018.02.030 // Geoforum. – 2018. – Vol. 91. – Pp. 73–77. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016718518300666?via%3Dihub> (дата обращения: 30.03.2020).

35. **Burdo, O.** Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes / O. Burdo, V. Bandura, A. Zykov [et al.]. – DOI 10.15587/1729-4061.2017.108843 // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, № 11 (88). – Pp. 34–42. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016718518300666?via%3Dihub> (дата обращения: 30.03.2020).

36. **Burdo, O. G.** Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials / O. G. Burdo, V. N. Bandura, Y. O. Levtrinskaya. – DOI 10.3103/S1068375518020047 // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2018. – Vol. 54, Issue 2. – Pp. 210–218. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1068375518020047> (дата обращения: 30.03.2020).

37. **Sabarez, H. T.** Ultrasound Assisted Low Temperature Drying of Food Materials / H. T. Sabarez, S. Keuhbauch, K. Knoerzer. – DOI 10.4995/IDS2018.2018.7329 // 21<sup>st</sup> International Drying Symposium Proceedings. – 2018. – Pp. 1245–1250. – URL: [https://www.researchgate.net/publication/330490810\\_Ultrasound\\_assisted\\_low\\_temperature\\_drying\\_of\\_food\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/330490810_Ultrasound_assisted_low_temperature_drying_of_food_materials) (дата обращения: 30.03.2020).

38. **Kumar, C.** Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review // C. Kumar, M. A. Karim. – DOI 10.1080/10408398.2017.1373269 // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 59, Issue 3. – Pp. 379–394. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10408398.2017.1373269?journalCode=bfsn20> (дата обращения: 30.03.2020).

*Поступила 02.10.2019; принята к публикации 16.11.2019; опубликована онлайн 30.06.2020*

*Об авторах:*

**Гербер Юрий Борисович**, профессор кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (295492, Россия, г. Симферополь, пос. Аграрное), доктор технических наук, Researcher ID: B-6690-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, [gerber\\_1961@mail.ru](mailto:gerber_1961@mail.ru)

**Гаврилов Александр Викторович**, доцент кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (295492, Россия, г. Симферополь, пос. Аграрное), кандидат технических наук, Researcher ID: ААН-5137-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, [tehfac@mail.ru](mailto:tehfac@mail.ru)

**Киян Наталья Сергеевна**, магистрант кафедры технологии и оборудования производства и переработки продукции животноводства Академии биоресурсов и природопользования ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (295492, Россия, г. Симферополь, пос. Аграрное), Researcher ID: ААН-5147-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7043-8962>, [natashik\\_1993@mail.ru](mailto:natashik_1993@mail.ru)

*Заявленный вклад соавторов:*

Ю. Б. Гербер – общая идея, обоснование цели и задач проведения эксперимента, руководство проведением исследований; А. В. Гаврилов – техническое обеспечение проведения экспериментов, обоснование модуля гелиоколлекторов; Н. С. Киян – проведение экспериментов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

## REFERENCES

1. Gerber Y.B., Gavrilov A.V., Verbitskiy A.P., et al. Using Integrated Energy Replacing Device for Milk Processing. *Izvestiya selskokhozyaystvennoy nauki Tavridy* = News of Taurida Agricultural Science. 2016; (7):52-59. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-kompleksnogo-energomezchayuschego-ustroystva-dlya-pererabotki-moloka/viewer> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

2. Gerber Y.B., Gavrilov A.V. Determination of Parameters of Section of Preheat of Pasteurizer with the Use of KEU. *Izvestiya selskokhozyaystvennoy nauki Tavridy* = News of Taurida Agricultural Science. 2016; (5):56-61. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-parametrov-sektsii-predvaritelnogo-podogreva-pasterizatora-s-ispolzovaniem-keu> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

3. Gerber Y.B., Gavrilov A.V., Kiyana N.S. Using Integrated Energy Substituting Device in Manufacturing Technology of Functional Foods “Atsidolakt”. *Izvestiya selskokhozyaystvennoy nauki Tavridy* = News of Taurida Agricultural Science. 2016; (6):60-66. Available at: <https://e.lanbook.com/reader/journalArticle/346730/#1> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

4. Botvinnikova V.V., Krasulya O.N. Formulation of Consumer Properties of Fermented Milk Products on the Basis of Ultrasound Exposure. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: pishchevye i biotekhnologii* = Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology. 2015; 3(4):30-40. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.14529/food150405>

5. Dorovskikh V.I., Dorovskikh D.V., Al-Lami S.F.H. Justification Criteria for Assessing the Effectiveness of Use Equipment for Primary Processing of Milk. *Nauka v Tsentralnoy Rossii* = Science in the Central Russia. 2016; (5):62-69. Available at: <https://clck.ru/MjF8t> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

6. Pasko O.V., Germanskaya L.G., Penzina O.V. Quality Management of the Cottage Cheese Bioproduct with Use of the HASSP Principles. *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2014; (8):34-37. Available at: <http://avu.usaca.ru/ru/issues/67/articles/1700> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

7. Gerber Y.B., Gavrilov A.V. To the Question of Designing a Modern Dairy Processing Plant. *Izvestiya sel'skokhozyaystvennoy nauki Tavriy* = News of Taurida Agricultural Science. 2018; (15):97-106. (In Russ.)

8. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Verbitsky A.P. Thermal Treatment in Milk Processing: Using a Complex Energy-Substitution Equipment during Preliminary Water Heating. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2018; 48(3):124-132. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-124-132>

9. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V., Kiyani N.S. Energy Indicators of Thermo-Mixing System Operation in a Milk Processing Line with the Use of a Complex Energy-Substituting Installation. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V. P. Goryachkina"* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2018; (6):65-69. Available at: <https://clck.ru/MjFzi> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

10. Gerber Yu.B., Gavrilov A.V. Machine Processing of Milk in Dairy Production. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2019; 49(3):375-382. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2019-3-375-382>

11. Kriger O.V., Noskova S.Yu. Properties of Lactic Acid Microorganisms: Long-Term Preservation Methods. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* = Food Processing: Techniques and Technology. 2018; (4):30-38. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-4-30-38>

12. Karpovich E.V. Prospective Uses of Solar Panels. *Selskokhozyaystvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont* = Agricultural Machinery: Maintenance and Repair. 2011; (4):34-36. Available at: <http://www.cnsnb.ru/cnsnb/newpost/arttrn.asp?val=1182693> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

13. Bobyl A.V., Zabrodskii A.G., Malyshkin V.G., et al. Sources of Alternative Energy Development. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2017; (92):31-35. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/istochniki-razvitiya-alternativnoy-energetiki> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

14. Brovtin V.N., Erk A.F. Optimization of Parameters of a Solar Water Heating Installation through Computational Experiment. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2013; (84):112-125. Available at: <https://docplayer.ru/42197151-V-nbrovcin-d-r-tehn-nauk-a-f-erk-kand-tehn-nauk.html> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

15. Brovtin V.N., Erk A.F. Substantiation of Optimal Parameters of Solar and Wind Energy Converters into Electricity. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2014; (85):72-84. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-optimalnyh-parametrov-preobrazovateley-energii-solntsa-i-vetra-v-elektricheskuyu> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)

16. Sudachenko V.N., Erk A.F., Timofeev E.V. Justification Criterion of Economic Efficiency of Joint Use of Traditional and Renewable Energy Sources. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovanogo proizvodstva produktov rastenievodstva i zhivotnovodstva* = Technologies, Machines and Equipment for Mechanized Crop and Livestock Production. 2017; (92):35-43. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-kriteriya-ekonomicheskoy-effektivnosti-sovmestnogo-ispolzovaniya-traditsionnyh-i-vozobnovlyaemyh-energoistochnikov> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
17. Marchenko O.V., Solomin S.V. Systemic Studies of Renewable Energy Efficiency. *Teploenergetika* = Heat Power Engineering. 2010; (11):12-17. (In Russ.)
18. Permyakov E.N. Unconventional Renewable Energy Sources: Status and Prospects for Development. *Energeticheskoe stroitelstvo* = Energy Construction. 2011; (12):15-21. (In Russ.)
19. Karaeva N.S., Kariev M.A. Development of Alternative Energy Sources in Solving Energy Problems. *Vestnik Kyrgyzskogo natsionalnogo agrarnogo universiteta im. K. I. Skryabina* = Bulletin of the Skryabin Kyrgyz National Agricultural University. 2014; (2):331-335. (In Russ.)
20. Alekseenko S.V. Unconventional Energy and Energy Saving. *Innovatsii. Tekhnologiya. Resheniya* = Innovation. Technology. Solutions. 2006; (3):8-41. Available at: <http://masters.donntu.org/2011/etf/korovin/library/article3/article3.htm> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
21. Milovanov I.V. Analysis of the Current State of the Energy Sector Development Using Alternative Energy Sources. *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Works of the Kuban State Agrarian University. 2013; (44):278-281. Available at: <https://kgau-works.kubsau.ru/issue/2013-44> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
22. Svalova V.B. Alternative Energy: Challenges and Prospects. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* = Monitoring. Science and Technology. 2015; (3):82-97. Available at: <http://csmos.ru/index.php?page=mnt-issue-2015-3-09> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
23. Shevcova S.V., Zholud D.S. Analysis of Foreign Experience of the Use of Alternative Types of Energy. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit* = Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit. 2010; (6):49-53. Available at: <https://clck.ru/MjNor> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
24. Muchinskaya A.V., Sinkevich A.N. Solar Energy in the Energy Supply System for Agricultural Consumers. *Selskokhozyaystvennyye nauki i agropromyshlennyy kompleks na rubezhe vekov* = Agricultural Sciences and Agro-Industrial Complex at the Turn of the Century. 2014; (8):158-161. Available at: <https://studylib.ru/doc/2102839/solnechnaya-e-nergiya-v-sisteme-e-nergosnabzheniya> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
25. Safonov V.A., Voskanyan A.A. Trends, Status, Opportunities, Perspectives of Development in Renewable Energy Sources (V) in the Republic of Crimea and Sevastopol. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* = Power Plants and Technologies. 2017; 3(4):55-64. (In Russ.)
26. Sabanchin V.R., Zanina A.F. Sun as an Alternative to Traditional Fuel. *Vestnik UGUES. Nauka. Obrazovanie. Ekonomika. Seriya: Ekonomika* = Bulletin of USUES. Science. Education. Economy. Series: Economy. 2014; (1):201-204. Available at: <http://www.ugues.ru/files/Вестник/Vipusk-7-2014.pdf> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
27. Engovatova V.V., Demin V.I., Ovchinnikova E.I., et al. Future Directions in the Field of Energy and Power of Crimea. *Nauchnye trudy KubGTU* = Scientific Works of Kuban State Technical University. 2015; (4):301-312. Available at: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0011/0392.pdf> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
28. Suhoruchkina T.Y., Atrasenko O.S. Problems of Development of Renewable Energy in Russia. *Energo- i resursosberezhenie. Promyshlennost u transport* = Energy and Resource Saving: Industry and Transport. 2016; (2):40-43. Available at: <https://clck.ru/MjQ8w> (accessed 30.03.2020). (In Russ.)
29. Tepe K., Agbenotowossi K., Djeteli G., et al. Determination of Basic Parameters of Solar Panels. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2010; (2):22-27. Available at: <http://naukarus.com/determination-of-basic-parameters-of-solar-panels> (accessed 30.03.2020). (In Eng.)
30. Gladyshev P.P., Filin S.V., Puzynin A.I., et al. Thin Film Solar Cells Based on CdTe and Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> (CIGS) Compounds. In: *Journal of Physics: Conference Series: 3<sup>rd</sup> Nanotechnology International Forum* (1-3 November, 2010). Moscow; 2010. Vol. 291. (In Eng.)

31. Clapp J., Newell P., Brent Z.W. The Global Political Economy of Climate Change, Agriculture and Food Systems. *The Journal of Peasant Studies*. 2018; 45(1):80-88. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/03066150.2017.1381602>
32. Govindan K. Sustainable Consumption and Production in the Food Supply Chain: A Conceptual Framework. *International Journal of Production Economics*. 2018; 195:419-431. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.003>
33. Cai X., Wallington K., Shafiee-Jood M., et al. Understanding and Managing the Food-Energy-Water Nexus – Opportunities for Water Resources Research. *Advances in Water Resources*. 2018; 111:259-273. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.11.014>
34. Prosekov A.Y., Ivanova S.A. Food Security: The Challenge of the Present. *Geoforum*. 2018; 91:73-77. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.02.030>
35. Burdo O., Bandura V., Zykov A., et al. Development of Wave Technologies to Intensify Heat and Mass Transfer Processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017; 4(11):34-42. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.108843>
36. Burdo O.G., Bandura V.N., Levtrinskaya Y.O. Electrotechnologies of Targeted Energy Delivery in the Processing of Food Raw Materials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2018; 54(2):210-218. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068375518020047>
37. Sabarez H.T., Keuhbauch S., Knoerzer K. Ultrasound Assisted Low Temperature Drying of Food Materials. In: 21<sup>st</sup> International Drying Symposium Proceedings; 2018. Pp. 1245-1250. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.4995/IDS2018.2018.7329>
38. Kumar C., Karim M.A. Microwave-Convective Drying of Food Materials: A Critical Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019; 59(3):379-394. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1373269>

*Received 02.10.2019; revised 16.11.2019; published online 30.06.2020*

*About the authors:*

**Yuriy B. Gerber**, Professor of Chair of Technology and Equipment for Production and Processing of Animal Products, Academy of Bioresources and Environmental Management of Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-6690-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3224-6833>, [gerber\\_1961@mail.ru](mailto:gerber_1961@mail.ru)

**Aleksandr V. Gavrilov**, Associate Professor of Chair of Technology and Equipment for Production and Processing of Animal Products, Academy of Bioresources and Environmental Management of Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russia), Ph.D. (Engineering), Researcher ID: AAH-5137-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3382-0307>, [tehfac@mail.ru](mailto:tehfac@mail.ru)

**Natalya S. Kiyani**, Postgraduate of Chair of Technology and Equipment for Production and Processing of Animal Products, Academy of Bioresources and Environmental Management of Vernadsky Crimean Federal University (Agrarnoye, Simferopol 295492, Russia), Researcher ID: AAH-5147-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7043-8962>, [natashik\\_1993@mail.ru](mailto:natashik_1993@mail.ru)

*Contribution of the authors:*

Yu. B. Gerber – general idea, formulation of the purpose and objectives of the experiment, management of the studies; A. V. Gavrilov – technical support for the experiments, justification of the heliocollector module; N. S. Kiyani – conducting experiments.

*All authors have read and approved the final manuscript.*