

УДК 637.133.3

DOI: 10.15393/j2.art.2015.2961

Статья

Применение индукционного нагревателя с выдерживателем в процессе пастеризации молока

Сергей В. Соловьев¹, Галина В. Макарова¹, Евгений А. Тихонов^{2*}

¹ ФГБОУ ВПО «Великолукская ГСХА», кафедра "Механизация животноводства и применение электроэнергии в сельском хозяйстве", 182112, Псковская обл., г. Великие Луки, пр-т. Ленина, д. 2; e-mail: mavrsol@yandex.ru (С. В. С.); Tel.: +7(963) 338 81 57.

² Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина 33, 185910, Петрозаводск, Россия; e-mail: tihonov@psu.karelia.ru (Т. Е. А.);

* Автор, с которым следует вести переписку; e-mail: tihonov@psu.karelia.ru; Tel.: +7(911)4089656.

Получена: 5 ноября 2014 / Принята: 5 февраля 2015 / Опубликована: 10 марта 2015

Аннотация: Предлагается разработка энергоэффективной пастеризационной установки, рассчитанной на фермерские хозяйства с поголовьем 100 голов дойного стада. В большинстве пастеризаторов косвенного нагрева, дополнительные затраты энергии идут на транспортировку вторичных теплоносителей и потери тепла через поверхности трубопроводов. Как следствие такие пастеризационные установки имеют пониженный коэффициент полезного действия и высокую энергоёмкость. Предлагается применить способ пастеризации молока с помощью индукционных нагревателей. Основной особенностью индукционного нагрева является выделение теплоты в самих нагреваемых телах, что позволяет передать в них больше мощности, получить высокий термический коэффициент полезного действия за счет выделения теплоты только в требуемых частях объемов. Целью данного исследования является определение рациональных геометрических размеров элементов индукционного нагревателя при заданной тепловой мощности, которые обеспечат равномерный нагрев молока по сечению нагревателя.

Ключевые слова: индукционный нагрев, сердечник, тепловой поток, изотермический слой, неравномерно распределенные источники тепла, тепло перепад, теплопроводность, тепловая производительность, цилиндрическая труба, граничные условия.

DOI: 10.15393/j2.art.2015.2961

Article

Use of the induction heater for milk pasteurization

Sergey V. Solovev ¹, Galina V. Makarova ¹, Evgeny Tihonov ^{2*}

¹ Velikoluksky State Agricultural Academy (SAA Velikolukskaya), Pskov region, Great Luke, ave. Lenina 2, Russian Federation; e-mail: mavrsol@yandex.ru (C. B. C.);
Tel.: +7(963) 3388157

² Petrozavodsk State University, Lenin av. 33, 185910 Petrozavodsk, Russia; e-mail:
tihonov@psu.karelia.ru (T. E. A.);

* Author to whom correspondence should be addressed; e-mail: tihonov@psu.karelia.ru (T. E. A.);
Tel.: +7(911)4089656.

Received: 5 November 2014 / Accepted: 5 February 2015 / Published: 10 March 2015

Abstract: Abstract: An energy-efficient pasteurizing unit is designed for farms with 100 heads of dairy herd. In most indirect heating pasteurizers, extra energy is spent for secondary coolants transportation and heat loss through the pipeline surface thus resulting in low efficiency and high power consumption. Induction heating is characterized by heat release in the heated bodies enabling them to transmit more power and to get high thermal efficiency due to heat generation only in the portions of the required volumes. The purpose of this study is to determine geometric dimensions of the elements of a rational induction heater for a given heat output and to ensure uniform heating of milk over the cross section of the heater.

Keywords: induction heating, the center hub, thermal stream, the isothermal layer, unevenly distributed sources of heat, heat differential, heat conductivity, thermal productivity, cylindrical tube, boundary conditions.

1. Введение

На 2013 год доля молока, произведенного фермерскими, личными подсобными хозяйствами и индивидуальными предпринимателями составила 27,3% (62,8 тыс. т), в то же время данный показатель за 2008 год составил - 25,3%. Рост показателей по фермерским и подсобным хозяйствам связан с увеличением поголовья с 0,8 до 2,0 тыс. голов. Среднее поголовье КРС в фермерских хозяйствах составляет 100 голов, а в подсобных хозяйствах 2-3 головы.

Дальнейшее повышение показателей ограничено наличием всего двух крупных перерабатывающих предприятий (Великолукский и Псковский молокозавод).

Реализация собственной продукции в оптовых сетях и через собственные магазины может принести большую прибыль, чем сдача на молокозаводы, однако для этого необходимо проводить первичную обработку сырого молока силами хозяйства. Мы предлагаем разработать энергоэффективную пастеризационную установку, рассчитанную на фермерские хозяйства с поголовьем 100 голов дойного стада, что позволит производить питьевое молоко, удовлетворяющее требованиям ГОСТа для последующей реализации в торговых сетях.

Пастеризация осуществляется при температурах ниже точки кипения продукта (от 65 до 95 °С). Выбор температурно-временных комбинаций режима пастеризации зависит от вида вырабатываемого продукта и применяемого оборудования, обеспечивающих требуемый бактерицидный эффект (не менее 99,98%), и должен быть направлен на максимальное сохранение первоначальных свойств молока, его пищевой и биологической ценности. При нагревании до 63...70°С и двадцатиминутной выдержке гибнет более 99,9 % бактерий. Такие же результаты достигаются при нагревании молока до 80...85°С без выдержки [1].

В большинстве пастеризаторов косвенного нагрева, дополнительные затраты энергии идут на транспортировку вторичных теплоносителей и потери тепла через поверхности трубопроводов. Как следствие такие пастеризационные установки имеют пониженный коэффициент полезного действия и высокую энергоёмкость.

Мы предлагаем применить способ пастеризации молока с помощью индукционных нагревателей. Основной особенностью индукционного нагрева является выделение теплоты в самих нагреваемых телах, что позволяет передать в них больше мощности, получить высокий термический коэффициент полезного действия за счет выделения теплоты только в требуемых частях объемов [2].

Применению индукционных нагревателей для пастеризации молока препятствует проблема неравномерного нагрева потоков жидкости в полостях устройства, что приводит в одном случае к перегреву, а в другом к недостаточному нагреву и как следствие к снижению качества получаемого продукта. Проблема осложняется тем, что при индукционном нагреве тепловая мощность по сечению трубы выделяется неравномерно, и нелинейно убывает по толщине от наружной поверхности к внутренней.

2. Цель и задача

Целью данного исследования является определение рациональных геометрических размеров элементов индукционного нагревателя при заданной тепловой мощности, которые обеспечат равномерный нагрев молока по сечению нагревателя.

Задачей является выявление основных параметров конструкции индукционного нагревателя.

Объектом исследования является экспериментальный индукционный нагреватель в составе пастеризационной установки новизна которого подтверждена патентом [3]. Конструкция нагревателя представлена на рисунке 1.

Индукционный нагреватель жидкости с выдерживателем включает в себя корпус 1, выполненный из пищевых пластмасс, нижнюю входную камеру 2 и верхнюю выходную камеру 3, снабжённые входным и выходным патрубками 4 и 5. Движение нагреваемой жидкости осуществляется через кольцевые зазоры 6, образованные коаксиально расположенными трубами 7 и стержнем 8, выполненными из нержавеющей стали.

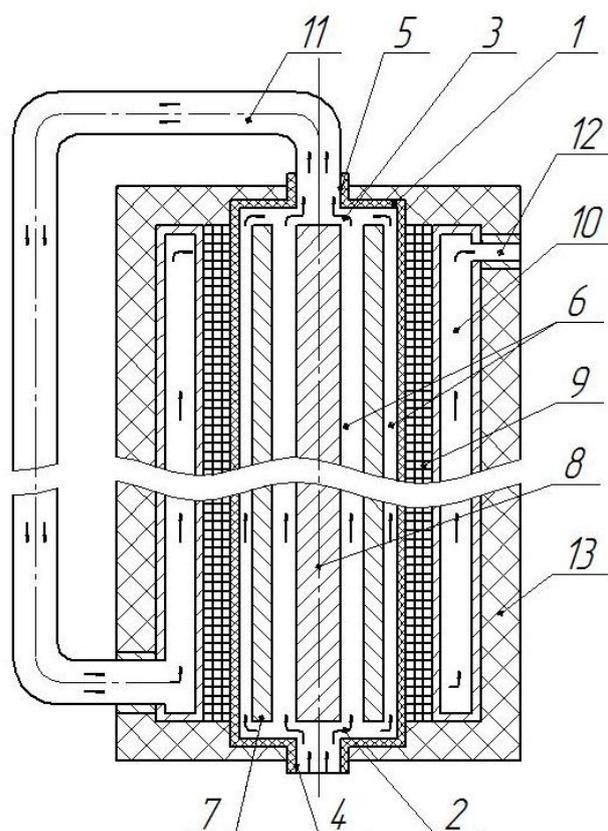


Рисунок 1. - Индукционный нагреватель с выдерживателем.

Снаружи корпуса размещена обмотка индуктора 9, поверх которой располагается выдерживатель 10, представляющий собой кольцевую емкость. Из нагревателя жидкость поступает в выдерживатель через обводную трубу 11. Выход пастеризованного молока осуществляется через выходной патрубок 12. Снаружи устройство защищено теплоизоляционным слоем 13.

Молоко нагревается в полостях 6 от трубы нагревателя 7. Стержень 8 выполняет роль вытеснителя и обеспечивает заданную толщину внутреннего кольцевого зазора. Труба 7 греется в следствии протекания по ней индукционных токов в магнитном поле. Это поле создается обмоткой индуктора 9. При работе индуктор так же выделяет тепло, причем его мощность составляет порядка 10% от мощности нагревателя [4]. Мы разместили снаружи обмотки индуктора выдерживатель 10, в котором тепловой поток от индуктора обеспечивает дополнительный подогрев молока. К тому же такая конструкция позволяет снизить тепловые потери в окружающую среду за счет уменьшения площади поверхности устройства.

Рассмотрим сердечник нагревателя 7, выполненный в виде цилиндрической трубы, которая имеет внутренний радиус r_1 , наружный радиус r_2 , постоянный коэффициент теплопроводности λ , и неравномерно распределенные источники тепла производительностью q_v . Тепло отдается в окружающую среду, как с наружной поверхности, так и с внутренней, при этом должен существовать максимум температуры внутри стенки трубы. Изотермическая поверхность, соответствующая максимальной температуре t_{max} , разделяет цилиндрическую стенку на два слоя - наружный и внутренний, которые передают тепло наружу и внутрь трубы соответственно (рис. 2, б). Максимальное значение температуры соответствует условию $dt/dr=0$ и тепловой поток через данную поверхность равен нулю $q=0$.

Введем значение радиуса r_0 , который соответствует максимальной температуре t_{max} . По радиусу r_0 проходит изотермический слой, который разделяет тепловые потоки на внутренний и наружный - q_1 и q_2 , Вт/м² при среднем выделении тепла в единице объема q_{v1} и q_{v2} , Вт/м³ (рис. 2, а).

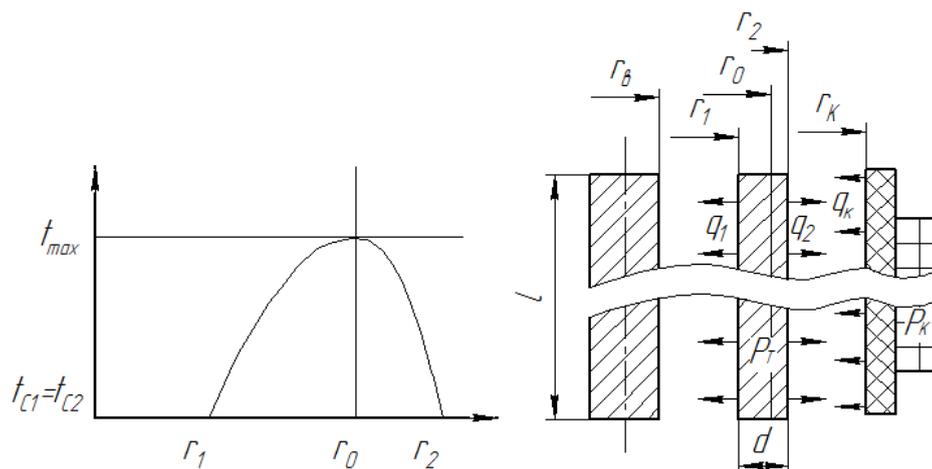


Рисунок 2. - Схема к расчету параметров сердечника индукционного нагревателя
 а - распределение температуры по сечению трубы; б - продольное сечение нагревателя.

Выделение тепла в единице объема q_v уменьшается нелинейно от внешней поверхности трубы радиусом r_2 до внутренней, радиусом r_1 , что связано с нелинейным убыванием напряженности электромагнитного поля, порожденного индуктором [4]. Если мы задаем внутренний и внешний радиусы трубы нагревателя, то радиус корпуса и вытеснителя и их длина зависят только от производительности и мощности тепловыделения в трубе. Эти величины определяются из выражений [5, 6].

$$r_B = \sqrt{r_1^2 - \frac{2q_T r_1 l}{V \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}} \quad (1)$$

$$r_K = \frac{q_K l + \sqrt{q_K^2 l^2 + V^2 c^2 (t_2 - t_1)^2 r_2^2 + 2V \cdot c \cdot (t_2 - t_1) q_T l \cdot r_2}}{V \cdot c \cdot (t_2 - t_1)} \quad (2)$$

$$l = \frac{P_T}{\pi(q_1 r_2 + q_2 r_1)} \quad (3)$$

где P_T - тепловая мощность, которая выделяется в трубе нагревателя, Вт.; q_T - тепловой поток с поверхности трубы, Вт/м²; V – скорость течения жидкости через кольцевые зазоры нагревателя, м/с; c – теплоемкость молока, Дж / (кг·К); q_K - тепловой поток через поверхность корпуса, который создается обмоткой индуктора, Вт/м²; t_1 - температура на входе в нагреватель, °С; t_2 - температура на выходе из нагревателя, °С;

В среде ANSYS нами разработана модель процесса пастеризации молока с помощью индукционного нагревателя с выдерживателем. В результате моделирования процесса пастеризации были получены распределения тепловых полей, представленные на рисунке 3.

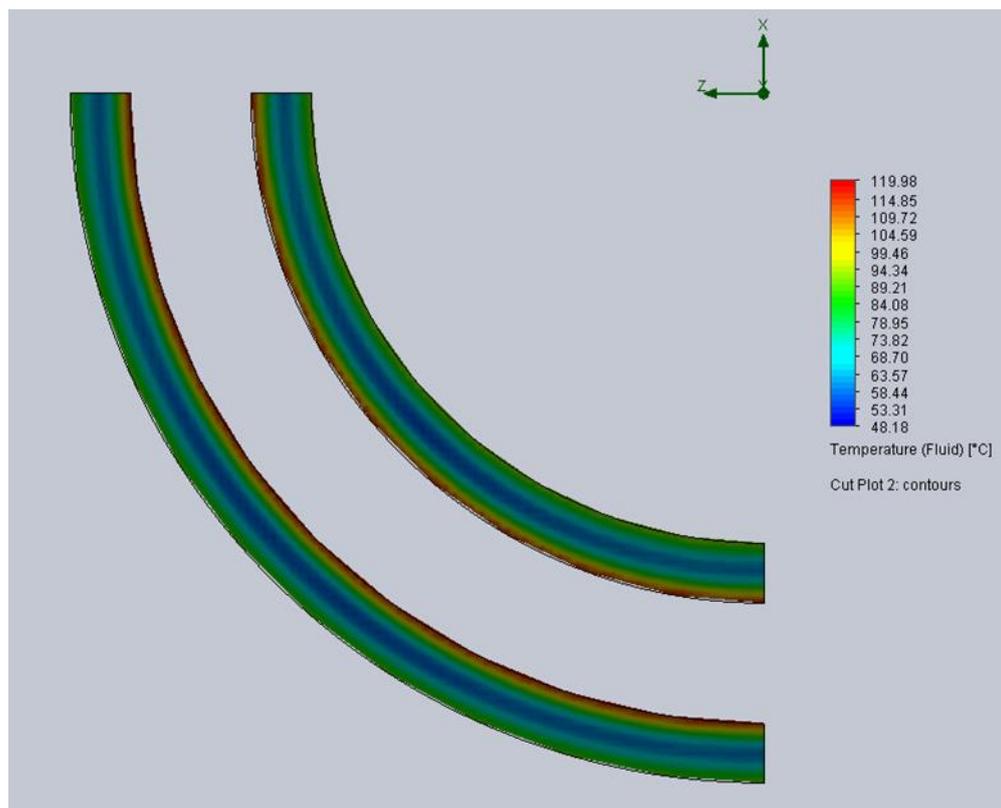


Рисунок 3. - Распределение теплового поля в зазорах по сечению нагревателя на выходе.

Диаграмма тепловых полей позволяет сделать вывод, что потоки нагреваются неравномерно - в середине зазора температура составляет 50°C в то время как у пристенного слоя, порядка 90°C . Следовательно необходимо провести оптимизацию величин зазоров и скорости течения жидкости.

На основе поисковых опытов, мы выбрали уровни варьирования с шагом 2мм от 2 до 6 мм и скоростью течения молока от 0,17 м/с до 0,3 м/с. В результате моделирования оптимальным зазор составил 2мм, скорость течения 0,26 м/с. Тогда картина теплового поля выглядит следующим наилучшим образом (рисунок 4).

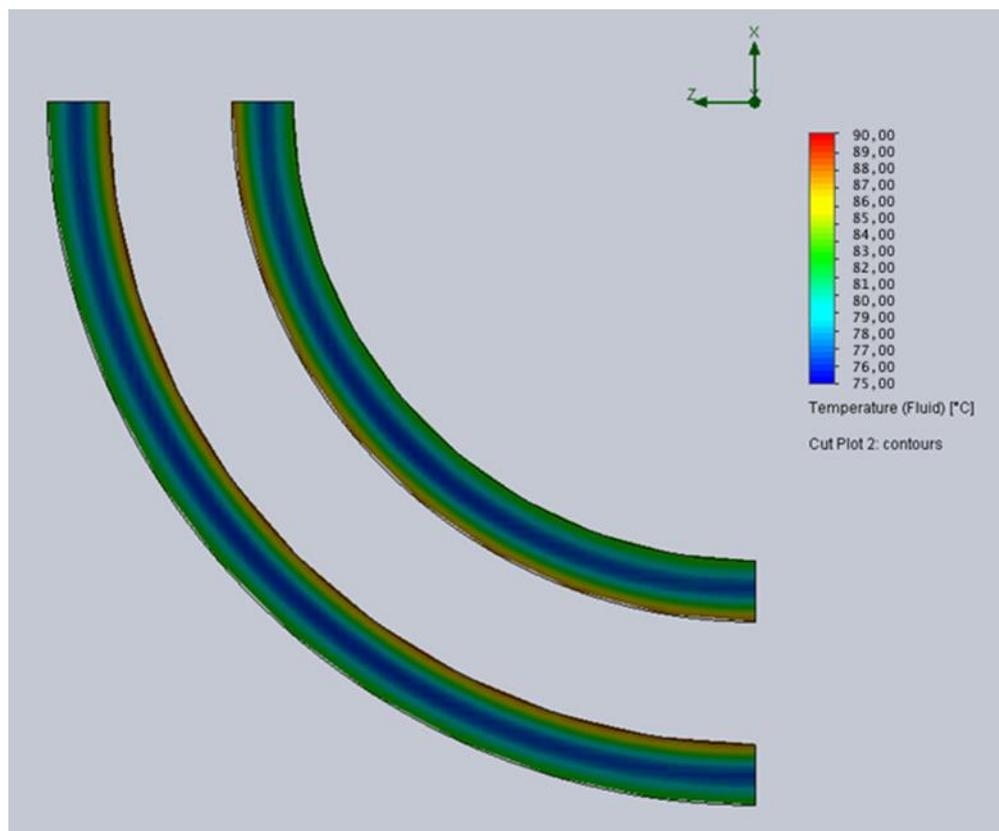


Рисунок 4. - Распределение теплового поля в зазорах по сечению нагревателя на выходе после оптимизации.

В ходе эксперимента перепад температур составлял $3,5^{\circ}\text{C}$. Таким образом нагрев жидкости по сечению зазоров происходит равномерно. Важно, что не происходит, перегрев молока в пристенном слое, а значит и не снижается его качество и не возникает пригара.

3. Выводы и предложения

Выявлено - равномерный нагрев молока по сечению нагревателя зависит от различных соотношений кольцевых зазоров в нагревателе, тепловой мощности и скорости потока.

На основе разработанной конструкции в лаборатории ВГСХА была выполнена экспериментальная пастеризационная установка на базе модернизированной ПМР-02-ВТ с заменой гидродинамического нагревателя на индукционный.

Экспериментальная пастеризационная установка с индукционным нагревателем собранная в лаборатории ВГСХА имеет следующие параметры: при производительности пастеризационной установки 450 л/ч полная мощность однофазного нагревателя составила 5,44 кВА; тепловая мощность нагревателя – 5,0 кВт. При этом конструктивные параметры

нагревателя составили: $r_2=21\text{мм}$; $r_1 - 17\text{мм}$; $r_0 - 19,3\text{мм}$; $r_k - 25\text{мм}$; $r_b - 10\text{мм}$; длина нагревателя $l - 1,1\text{м}$.

В результате внедрения энергопотребление процесса пастеризации снизилось на 12% в сравнении с первоначальной технологической линией, используемой в хозяйстве.

Литература

1. Кук Г.А. Процессы и аппараты молочной промышленности / Г.А. Кук - Пищепромиздат М.: 1955. - 474 с.
2. Нейман Л. Р. Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л.Р. Нейман - Госэнергоиздат - Л.: 1949, 190 с.
3. Патент на полезную модель RU 137709 U1. Индукционный нагреватель жидкости с выдерживателем / Макарова Г. В., Соловьёв С.В., Шилин В.А., заявлено 10.07.2013, опубликовано 27.02.2014 Бюл. № 6.
4. Немков В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. Л. - Энероатомиздат 1988 - 280 с.
5. Соловьёв С.В. Теоретические предпосылки к обоснованию конструктивных параметров индукционного нагревателя в составе пастеризационной установки молока/ Соловьёв С.В., Макарова Г.В. / Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2014, №8. с. 120 - 125.
6. Макарова Г.В. Теоретическое обоснование тепловой мощности в индукционном нагревателе/ Макарова Г.В., Соловьёв С.В. / Материалы международной научно-практической конференции "Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования"/ Санкт-Петербургский Аграрный университет Санкт-Петербург. - 2012, с. 314-317.

References

1. Kuk G. A. Processes and devices of the dairy industry / G. A. Kuk - Pishchepromizdat M.: 1955. - 474 p.
2. Neiman L. R. Surface effects in ferromagnetic bodies / L. R. Neumann - Gosenergoizdat - L : 1949, 190 p.
3. Patent for utility model RU 137 709 U1. Induction liquid heater with sustain / Makarova G. V., Soloviev S. V., Shilin V. A., stated 10.07.2013, published 27.02.2014 Bull. Number 6
4. Nemkov V. S. Theory and Design of induction heating devices / V. S. German, V. B. Demidovich. L - Eneroatomizdat 1988 - 280 p.
5. Solovyov S. V. Theoretical background to the justification of the design parameters of the induction heater in the composition of milk pasteurization installation / Soloviev S. V., Makarova G. V. / Bulletin of the Altai State Agrarian University. - 2014, №8. p. 120 - 125.
6. Makarova G. V. Theoretical study of thermal power in the induction heater / Makarova G. V., Soloviev S. V. / Proceedings of the international scientific-practical conference "Scientific support for the development of agro-industrial complex in the conditions of reforming" / St. Petersburg Agrarian University of St. Petersburg. - 2012, p. 314-317.