

Обоснование параметров конструктивных элементов индукционного нагревателя для пастеризации молока в потоке

С.В. Соловьёв, к.т.н., В.В. Морозов, д.т.н., профессор, Е.В. Радкевич, ст. преподаватель, ФГБОУ ВО Великолукская ГСХА; Л.П. Карташов, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ; З.В. Макаровская, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Московский ГПГУ

Тепловая обработка молока проводится с целью бактериального обеззараживания при максимально возможном сохранении свойств в специальных пастеризационных установках.

Пастеризацию осуществляют при температурах от 63°C с выдержкой времени до 95°C — без выдержки. Температурно-временные комбинации режима тепловой обработки выбираются в зависимости от обрабатываемого продукта и технологического оборудования. Пастеризация может проводиться в ваннах длительной пастеризации при температуре 63–70°C и выдержке времени до 20 мин или в проточных нагревателях и теплообменниках при $t = 80–95^\circ\text{C}$ и выдержке времени 0–15 сек. В любом случае пастеризация должна обеспечивать бактерицидный эффект (не менее 99,98%) и максимальное сохранение витаминов, белков, пищевой и биологической ценности продукта [1].

При тепловой обработке молока используют аппараты прямого и косвенного нагрева с применением промежуточных теплоносителей. В настоящее время наиболее распространёнными промежуточными теплоносителями в технологических установках пастеризации молока являются пар и горячая вода.

Паровые пастеризаторы производительностью 500–1000 кг/ч молока энергетически не эффективны, так как их использование сопряжено с дополнительными затратами на установку и обслуживание паровых котлов-парообразователей, вспомогательного оборудования, со сложной системой автоматизации поддержания технологических параметров, пажаро-взрывоопасностью [2].

Пастеризаторы косвенного нагрева затрачивают часть энергии на транспортировку промежуточного теплоносителя и компенсацию тепловых потерь через поверхности трубопроводов. Это приводит к снижению коэффициента полезного действия и ограничивает возможность плавной регулировки нагрева и изменения режимов работы.

При применении в качестве источника теплоты в пастеризаторах косвенного нагрева индукционного нагревателя промежуточный теплоноситель не требуется, что открывает возможности для повышения тепловой эффективности таких установок.

Процесс пастеризации молока с помощью индукционных нагревателей осуществляется следующим образом. В металлическом изделии, по-

мещённом в переменное электромагнитное поле, протекают вихревые токи, вызывающие нагрев. Такой способ нагрева обычно используют при термообработке металлов. При индукционном нагреве тепловая энергия выделяется в самих нагреваемых металлических телах, что способствует получению высокого термического коэффициента полезного действия.

По сравнению с ТЭНовыми или гидродинамическими нагревательными устройствами индукционные имеют следующие преимущества:

- пожаробезопасность — достигается за счёт того, что греющаяся часть имеет температуру на 10–15°C выше температуры нагреваемой жидкости;

- низкая разность температур, снижение интенсивности образования накипи или отложения молочного камня;

- индукционные нагреватели не имеют подвижных частей и, как следствие, более надёжны и просты по сравнению с гидродинамическими нагревателями;

- рабочий ресурс индукционного нагревателя ограничивается сроком службы изоляции обмотки и составляет 50 тыс. час, ресурс класса элементных нагревателей составляет 9 тыс. час [3].

Материал и методы исследования. В настоящее время индукционные нагреватели не нашли применения в качестве пастеризаторов, несмотря на явные преимущества по сравнению с нагревателями иного типа. Это объясняется отсутствием теоретической и практической базы применения индукционных нагревателей в составе пастеризационных установок. Использовать существующие конструкции индукционных нагревателей воды в целях пастеризации молока в потоке не представляется возможным в связи с неравномерным нагревом молока по сечению нагревателя. При ламинарном течении слои молока, прилегающие к греющейся части устройства, будут иметь значительно более высокую температуру, чем предполагает технологический процесс пастеризации, и одновременно с этим могут иметься слои с температурой, недостаточной для гарантированного уничтожения бактерий.

Для устранения этих недостатков необходимо разработать индукционный нагреватель молока и учесть в конструкции требования, предъявляемые к процессу пастеризации.

Предметом теоретического расчёта установки для пастеризации молока с индукционным нагревателем является разработка конструкции нагревателя для обеспечения равномерности нагрева молока при его движении в потоке.

Задачей теоретического расчёта является выявление математической зависимости конструктивных параметров индукционного сердечника от требуемой для обеспечения процесса пастеризации тепловой мощности при исключении неравномерности нагрева молока в потоке.

Результаты исследования. Бесконечно длинная цилиндрическая труба имеет внутренний радиус r_1 , наружный радиус r_2 , постоянный коэффициент теплопроводности λ и неравномерно распределённые по объёму цилиндрической трубы источники тепла производительностью q_v . Теплообмен с окружающей средой осуществляется как с наружной, так и с внутренней поверхности. Поверхность теплообмена торцов трубы ввиду её малой площади в расчёте не учитывается.

Источником теплоты выступают вихревые токи, протекающие по замкнутому контуру в объёме металлической трубы нагревателя. Распределение плотности тока по сечению трубы неравномерно и уменьшается в направлении от внешней поверхности к внутренней. Примерное распределение температур по сечению стенки трубы нагревателя представлено на рисунке 1а. На радиусе r_0 в слое с максимальной температурой t_{max} находится изотермическая поверхность, разделяющая тепловые потоки на два направления – к внутренней поверхности трубы q_1 и к наружной q_2 . Введём понятие среднего тепловыделения в единице объёма для наружного q_{v1} и внутреннего слоя q_{v2} . Для упрощения модели примем, что $q_{v1} = \text{const}$ в интервале $r_1 \dots r_0$, а $q_{v2} = \text{const}$ в интервале $r_0 \dots r_2$.

Тогда средняя тепловая производительность будет определяться по выражениям:

– для внутреннего слоя:

$$q_{v1} = \frac{\int_{r_1}^{r_0} q_v dr}{r_0 - r_1}, \quad (1)$$

где q_{v1} – средняя по внутреннему слою тепловая производительность, Вт/м³;

q_v – тепловая производительность на радиусе r , Вт/м³;
 r_0 – изотермический радиус, м;
 r_1 – радиус внутренней поверхности трубы, м;
 – для наружного слоя:

$$q_{v2} = \frac{\int_{r_0}^{r_2} q_v dr}{r_2 - r_0}, \quad (2)$$

где q_{v2} – средняя по наружному слою тепловая производительность, Вт/м³;

r_2 – радиус наружной поверхности трубы, м.

Для определения неизвестной величины r_0 решим уравнение, описывающее процесс теплопроводности в нагревателе [4]:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} + \frac{q_v}{\lambda} = 0, \quad (3)$$

где t – температура в точке с радиусом r , °С;

λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

$$r_0^2 = \frac{kq_{v2}r_2^2 + q_{v1}r_1^2}{q_{v1} + kq_{v2}}, \quad (4)$$

$$k = q_2 / q_1. \quad (5)$$

Величина k определяется экспериментально для цилиндрических труб разной толщины и диаметров. Для того чтобы определить величину k , мы измеряли разность температур молока на входах и выходах из кольцевых зазоров.

Для снижения трудозатрат на изготовление нагревателя трубу, которая является источником теплоты, целесообразно принимать из стандартного ряда типоразмеров стального проката. Тогда расчёт параметров нагревателя сводится к определению внутреннего радиуса корпуса, вытеснителя и длины нагревателя.

Для схемы, приведённой на рисунке 2, тепловые мощности $P_{ПТ1}$ и $P_{ПТ2}$, получаемые потоками жидкости в кольцевых зазорах, находятся из выражений:

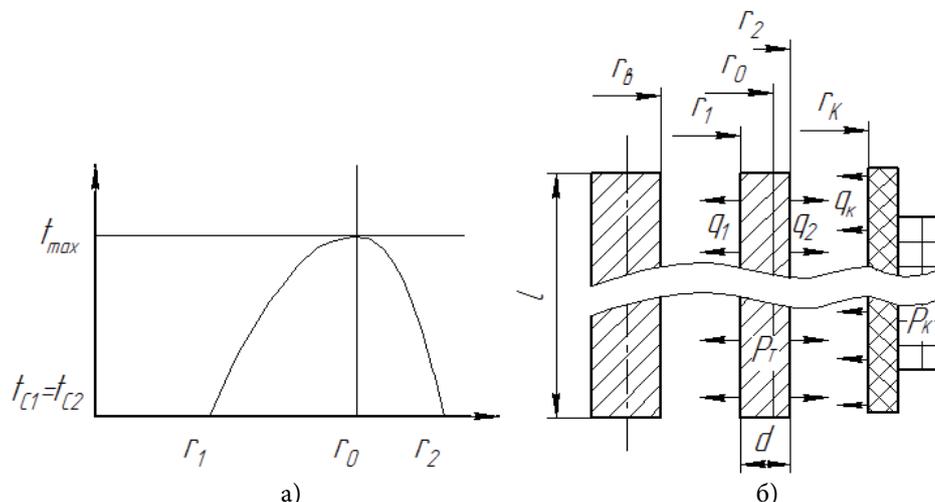


Рис. 1 – Схема к расчёту параметров сердечника индукционного нагревателя:
 а) распределение температуры по сечению трубы; б) продольное сечение нагревателя

$$\begin{cases} P_{\text{ПТ1}} = q_{T1} F_T^B = W_1 c \cdot (t_2 - t_1) = \\ = V \pi \cdot c \cdot (t_2 - t_1) (r_1^2 - r_B^2) \\ P_{\text{ПТ2}} = q_{T1} F_T^H + q_K F_K = W_3 c \cdot (t_2 - t_1) = \\ = V \pi \cdot c \cdot (t_2 - t_1) (r_K^2 - r_2^2) \end{cases} \quad (6)$$

где $P_{\text{ПТ1}}$ – тепловая мощность в зазоре, ограниченном радиусами r_B и r_1 , Вт;
 $P_{\text{ПТ2}}$ – тепловая мощность в зазоре, ограниченном радиусами r_2 и r_K , Вт;
 q_{m1} – тепловой поток с поверхности трубы, Вт/м²;
 F_T^B, F_T^H – площади поверхности трубы нагревателя, м²;
 V – скорость движения молока через кольцевые зазоры, м/с;
 c – теплоёмкость молока, Дж/(кг·К);
 q_K – тепловой поток, создаваемый обмоткой индуктора, Вт/м².

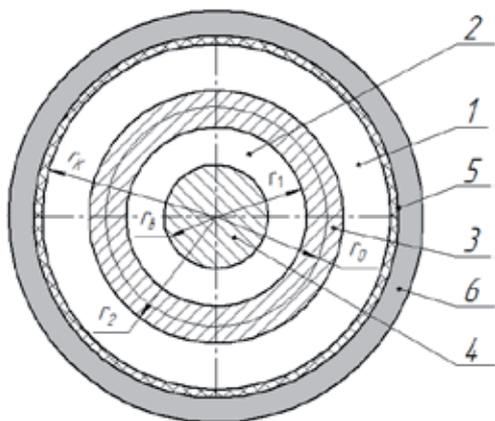


Рис. 2 – Поперечное сечение индукционного нагревателя молока:
 1 – наружный зазор; 2 – внутренний зазор; 3 – труба;
 4 – вытеснитель; 5 – корпус; 6 – обмотка индуктора

Тепловой поток, создаваемый при протекании электрического тока через обмотку индуктора, определяется по выражению:

$$q_K = \frac{P_{об}}{F_K} = \frac{I_1^2 R}{2 \cdot \pi \cdot r_K \cdot l_K} \quad (7)$$

где $P_{об}$ – мощность, выделяющаяся в индукторе при работе, Вт;
 F_K – часть площади корпуса, участвующая в теплообмене с молоком, м²;
 I_1 – сила тока обмотки индуктора, А;
 R – сопротивление переменному току обмотки индуктора, Ом;
 l_K – длина корпуса, м.

Из системы уравнений (6) найдем r_K и r_B :

$$r_B = \sqrt{r_1^2 - \frac{2q_{T1} r_1 l}{V \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}}, \quad (8)$$

$$r_K = \frac{q_K l + \sqrt{q_K^2 l^2 + V^2 c^2 (t_2 - t_1)^2 r_2^2 + 2V \cdot c \cdot (t_2 - t_1) q_T l \cdot r_2}}{V \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}. \quad (9)$$

Длина трубы равна:

$$l = \frac{P_T}{\pi(q_1 r_2 + q_2 r_1)}, \quad (10)$$

где P_T – тепловая мощность, которая выделяется в трубе нагревателя, Вт.

Согласно приведённым выше теоретическим расчётам и для их подтверждения в лаборатории Великолукской ГСХА была разработана экспериментальная установка пастеризации молока индукционным нагревом [5]. Изготовление экспериментальной установки было произведено на базе ПМР-02-ВТ с модернизацией нагревателя. Штатный гидродинамический нагреватель был заменён на экспериментальный индукционный (рис. 3) [6].

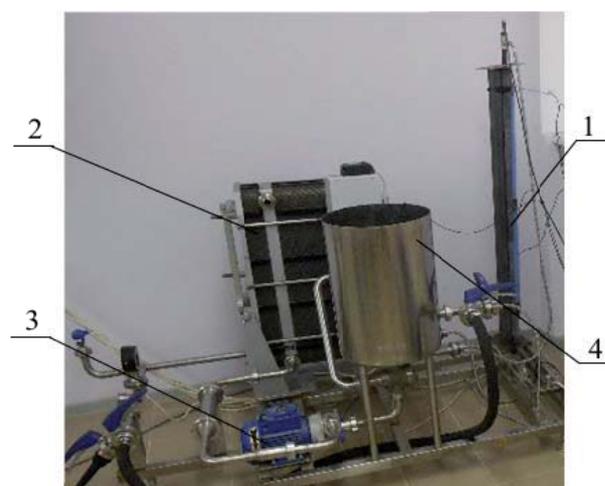


Рис. 3 – Общий вид разработанной установки для пастеризации молока с индукционным нагревателем:
 1 – индукционный нагреватель; 2 – теплообменник;
 3 – молочный насос; 4 – приёмный молочный бак

Определены следующие технические характеристики установки для пастеризации молока с индукционным нагревателем: полная мощность однофазного нагревателя – 5,4 кВА; тепловая мощность нагревателя – 5,0 кВт; коэффициент мощности – 0,86; расчётная удельная мощность 11,0–11,2 Вт/л; расчётная производительность (для температуры пастеризации 78–80°C) 430–450 л/ч [6]. При этом конструктивные размеры нагревателя составили: $r_2 = 21$ мм; $r_1 = 17$ мм; $r_0 = 19,3$ мм; $r_K = 25$ мм; $r_B = 10$ мм; длина нагревателя 1–1,1 м.

Выводы. Представленный алгоритм расчёта применим при определении параметров и режима работы индукционного нагревателя молока при производительности и мощности, определяемой требованиями выполняемого технологического процесса.

Выявлено, что тепловая энергия, обеспечиваемая индукционным нагревателем, зависит от диаметров и толщины стенок корпуса, сердечника и вытеснителя, получено соответствующее выражение.

Установлено, что на интенсификацию процесса тепловой обработки молока в большей степени оказывают влияние внутренний радиус корпуса и вытеснителя.

Литература

1. Крусь Н.А. Технология производства молока и молочных продуктов. М.: Колос, 2004. 386 с.
2. Ведищев С.М., Милованов А.В. Технологии и механизация первичной обработки молока. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. 152 с.
3. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчёт устройств индукционного нагрева. Л.: Энероатомиздат, 1988. 280 с.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1969. 440 с.
5. Макарова Г.В., Соловьев С.В. Теоретическое обоснование тепловой мощности в индукционном нагревателе // Научное обеспечение развития АПК в условиях реформирования: матер. междунар. науч.-практич. конф. СПб., 2012. С. 314–317.
6. Пат. на полезную модель RU 137709 U1. Индукционный нагреватель жидкости с выдерживателем / Г.В. Макарова, С.В. Соловьёв, В.А. Шилин; заявл. 10.07.2013, опублик. 27.02.2014. Бюл. № 6.