

Заключение. Соблюдение вышеизложенных правил позволит снизить неблагоприятное воздействие опасных производственных факторов на работающих и минимизировать случаи травматизма при производстве земляных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каковы основные причины травматизма при выполнении земляных работ? [Электронный ресурс]. – Stroy-Machines. – Режим доступа : <http://stroy-machines.ru/content/view/1051/140/>. – Дата доступа: 06.11.2019.
2. Правила по охране труда при выполнении строительных работ, утвержденные постановлением Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь и Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь 31.05.2019, № 24/33.
3. Обеспечение охраны труда при проведении мелиоративных мероприятий / В. Н. Босак, А. С. Алексеенко, А. Е. Кондраль, А. Н. Кудрявцев // Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства: сб. науч. работ. – Горки: БГСХА, 2018. – С. 99–101.

УДК 637.133.3

ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПАСТЕРИЗАЦИИ МОЛОКА С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВАТЕЛЕМ

С. В. СОЛОВЬЕВ, канд. техн. наук, доцент
Р. В. ТИМОШЕНКОВ, магистрант
ФГБОУ ВО «Великолукская ГСХА»,
Великие Луки, Российская Федерация

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

Пастеризацию осуществляют при температурах от 63 °С с выдержкой времени до 95 °С без выдержки. Температурно-временные комбинации режима тепловой обработки выбираются в зависимости от обрабатываемого продукта и технологического оборудования. В любом случае пастеризация должна обеспечивать бактерицидный эффект (не менее 99,98 %) при максимальном сохранении 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 распространенными промежуточными теплоносителями в технологических установках пастеризации молока являются пар и горячая вода.

Паровые пастеризаторы производительностью 500–1000 кг/ч молока энергетически неэффективны, так как их использование сопряжено с дополнительными затратами по установке и обслуживанию паровых котлов-парообразователей, вспомогательного оборудования, сложной системой автоматизации поддержания технологических параметров, пожаро- и 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 возможности 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. 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 счет того, что греющаяся часть имеет температуру на 10–15 °С выше температуры нагреваемой жидкости;
- низкая разность температур также снижает интенсивность образования накипи или отложения молочного камня;
- индукционные нагреватели не имеют подвижных частей и, как следствие, более надежны и просты по сравнению с гидродинамическими нагревателями;
- рабочий ресурс индукционного нагревателя ограничивается сроком службы изоляции обмотки и составляет 50 тыс. часов, ресурс класса элементных нагревателей составляет 9 тыс. часов [3].

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.

Основная часть. Предметом теоретического расчета установки для пастеризации молока с индукционным нагревателем является разработка конструкции нагревателя, которая обеспечивает равномерный нагрев молока при его движении в потоке.

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

Рассмотрим бесконечно длинную цилиндрическую трубу, которая имеет внутренний радиус r_1 , наружный радиус r_2 , постоянный коэффициент теплопроводности λ и неравномерно распределенные по объему 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 ее малой площади в расчете не учитывается.

Как было указано выше, источником теплоты выступают вихревые токи, протекающие по замкнутому контуру в объеме металлической трубы нагревателя. Распределение плотности тока по сечению трубы неравномерно и уменьшается в направлении от внешней поверхности к внутренней. 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 . Введем понятие среднего тепловыделения в единице объема 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:

$$q_{v2} = \frac{\int_0^{r_2} q_v dr}{r_2 - r_0}, \quad (2)$$

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 расчет параметров нагревателя сводится к определению внутреннего радиуса корпуса, вытеснителя и длины нагревателя.

Для схемы, приведенной на рис. 1, тепловые мощности $P_{ПТ1}$ и $P_{ПТ2}$, получаемые потоками жидкости в кольцевых зазорах, находятся из выражений:

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

где $P_{ПТ1}$ – тепловая мощность в зазоре, ограниченном радиусами r_B и r_1 , Вт;

$P_{ПТ2}$ – тепловая мощность в зазоре, ограниченном радиусами r_2 и r_K , Вт;

q_{T1} – 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 – теплоемкость молока, Дж/(кг·К);

q_K – тепловой поток, создаваемый обмоткой индуктора, Вт/м².

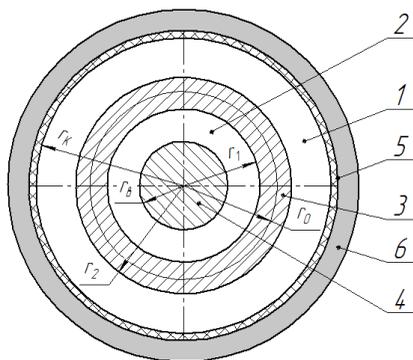


Рис. 1. Поперечное сечение индукционного нагревателя молока:
 1 – Наружный зазор; 2 – внутренний зазор; 3 – труба; 4 – вытеснитель;
 5 – корпус; 6 – обмотка индуктора

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, m^2 ;

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 :

$$r_b = \sqrt{r_1^2 - \frac{2q_{T1}r_1l}{V \cdot c \cdot (t_2 - t_1)}}, \quad (8)$$

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

Длина трубы:

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

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

Согласно приведенным выше теоретическим расчетом и для их подтверждения в лаборатории Великолукской ГСХА была разработана экспериментальная установка пастеризации молока индукционным нагревом [6].

Изготовление экспериментальной установки было произведено на базе ПМР-02-ВТ с модернизацией нагревателя. Штатный гидродинамический нагреватель был заменен на экспериментальный индукционный [5].

Установленные 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; расчетная удельная мощность 11,0–11,2 Вт/л; расчетная производительность (для температуры пастеризации 78–80 °С) 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 $l = 1,1$ м.

Заключение. Представленный алгоритм расчета 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 оказывает влияние внутренний радиус корпуса и вытеснителя.

ЛИТЕРАТУРА

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