

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС ДОСТИЖЕНИЙ ТАЛАНТЛИВОЙ
МОЛОДЁЖИ
«НАЦИОНАЛЬНОЕ ДОСТОЯНИЕ РОССИИ»**

Направление: Технологии, техническое творчество

**Тема: «Исследование параметров и режимов работы электротеплового
оборудования в процессах термической обработки сельскохозяйственной
продукции и кормов»**

Соискатели:

Хитиев Алидар Мухамедович

Гукежев Кантемир Азаматович

Научный руководитель:

Хамоков Марат Мухамедович

Место выполнения работы:

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный
университет имени В.М. Кокова»**

Содержание

Введение	3
1 Методика расчета инфракрасного излучателя электрической установки пастеризации жидких продуктов	3
1.1 Расчет энергетических и конструктивных параметров электрического ИК-излучателя	5
1.2 Расчет электрических, теплоэнергетических и конструктивных параметров инфракрасного излучателя для установки пастеризации жидких продуктов в тонком слое производительностью до 1т/ч	9
2 Исследование процессов и параметров электротермического оборудования в технологии углубленной обработки комбикормов	11
Выводы	18
Список литературы	19

Введение

К числу широко распространенных и энергоемких процессов первичной обработки жидких пищевых продуктов (молоко, соки и т.д.) с целью их консервации относится термообработка. При этом ставится задача снижения энергоемкости процесса при максимальном сохранении питательных и вкусовых качеств продукта.

Для повышения питательной ценности и скармливания фуражного зерна, применяют различные технологии тепловой обработки: гранулирование, экструдирования, экспандирование, микронизация и др. [2]. Важная роль отводится тепловой обработке в различных способах приготовления кормов для животных: запаривании, дрожжевании, стерилизации и т.д. [3, 4, 5, 6].

Все эти технологические процессы также носят энергозатратный характер, поэтому задача по снижению их энергоемкости является весьма актуальной.

1 Методика расчета инфракрасного излучателя электрической установки пастеризации жидких продуктов

Одним из эффективных и энергетически выгодных способов тепловой обработки жидких продуктов представляется использование инфракрасной (ИК) области спектра электромагнитных волн [1]. При воздействии инфракрасного излучения обеспечивается передача энергии непосредственно от источника излучения к обрабатываемой жидкости при отсутствии контакта между ними.

Плотность теплового потока на поверхности материала значительно больше, чем при конвективном и кондуктивном нагреве.

ИК излучение проникает на определенную глубину, что исключает местный перегрев и нежелательные структурные изменения поверхностного слоя (разложение и пригорание жидкости). Наиболее целесообразно ИК облучением осуществлять поверхностный или сквозной нагрев продукта в тонком слое [7]. При таком способе нагрева обрабатывается вся порция жидкого продукта, и она не перегревается выше заданной температуры. При температуре излучателя 800...1000 °С слой воды толщиной 2 мм поглощает около 100% лучистой энергии [8].

Вопросам ИК пастеризации молока в тонком слое посвятили свои научно-практические работы Елисеев Н.Н., Карумидзе Г.И., Пальмов Ф.В., Чапурин В.А., Кузьмичев А.В. и другие ученые.

Кратковременное воздействие ИК излучения с высокой плотностью одновременно по всей толщине и площади тонкого слоя жидкости создает необходимые условия для ликвидации токсичной и балластной микрофлоры, позволяя сохранить полезные биологические и физико-химические компоненты (белки, витамины, ферменты), определяющие питательные и органолептические свойства продукта [8].

Обеззараживанию молока УФ и ИК излучением посвящена работа Летаева С.А. [9].

На рисунке 1. показана технологическая схема пастеризационной установки жидких продуктов (разработка ГНУ ВИЭСХ при участии автора), где между рекуперативным теплообменником и ИК пастеризатором пленочного типа, дополнительно установлен УФ излучатель для обеззараживания воды, используемой на собственные технологические цели [10].

Пленочные аппараты отличаются малым гидравлическим сопротивлением, небольшой материалоемкостью и компактностью. Вопросам формирования, обоснования параметров и режимов тонкослойного течения посвящена работа Г.И. Карумидзе [11].

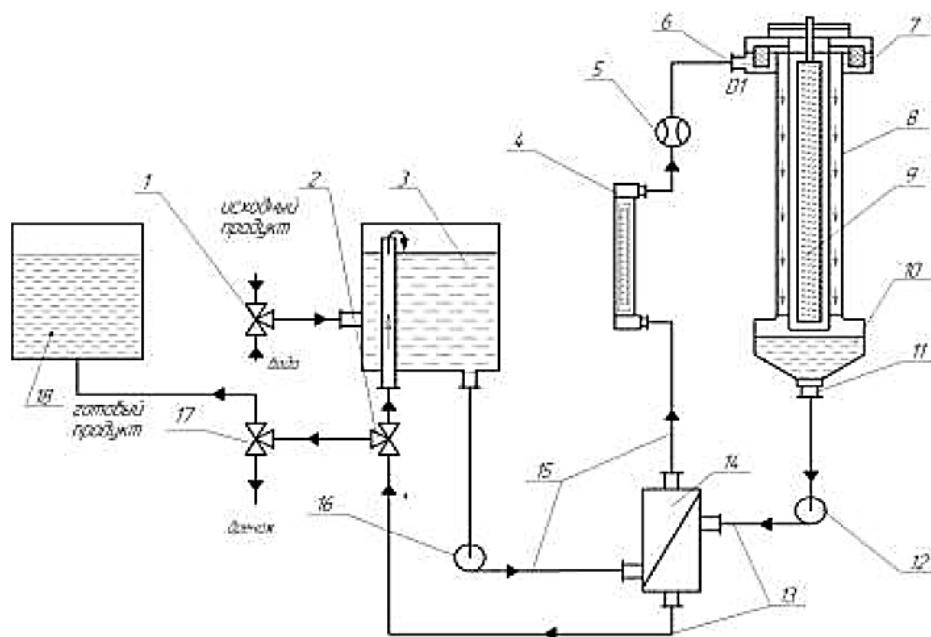


Рисунок 1 – Технологическая схема ИК пастеризатора: 1- молочный вентиль, 2- клапан, 3- приемный бак, 4- УФ-излучатель, 5 - молочный вентиль-дозатор, 6- патрубок входной ИК-пастеризатора, 7- поплавок, 8- камера пастеризатора, 9- ИК-излучатель, 10- приемная камера, 11- выходной патрубок, 12- термоматчик, 13- насос выдачи, 14- трубопровод выдачи, 15- теплообменник, 16- трубопровод подачи

В ГНУ ВИЭСХ при участии автора разработан экспериментальный образец модульной установки для ИК обработки жидких пищевых продуктов в непрерывном потоке тонкого слоя (рисунок 2).

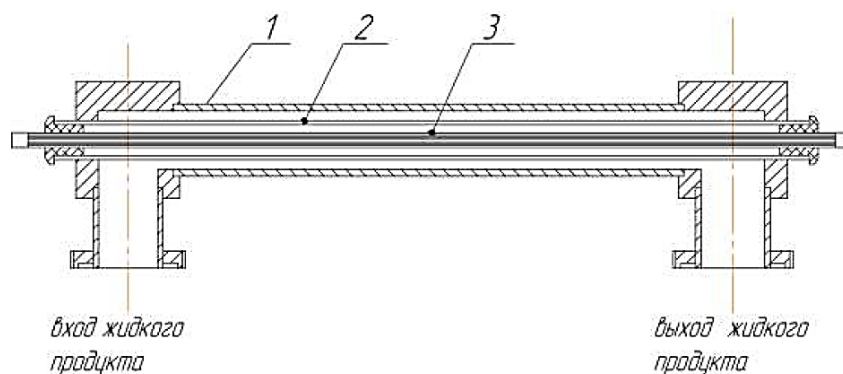


Рисунок 2 – Модуль ИК обработки жидких продуктов: 1– корпус; 2 – кварцевая трубка; 3 – излучатель

Аппараты с тонкослойным течением жидкости могут быть выполнены по различным схемам. В зависимости от расположения источника энергии и его формы различают вертикальное, наклонное и горизонтальное течение жидкости. Известны ИК пастеризаторы типа УЗМ ООО «НПП Дайри» (Украина), А1-ОПЭ «Экомаш», установка с ИК и УФ облучением [2, 13] и др.

В то же время большинство рассмотренных установок имеют схожую геометрическую конструкцию камеры пастеризации: два коаксиально расположенных цилиндра, из которых один – излучатель, а другой – сформированный слой нагреваемого жидкого продукта.

При обосновании параметров ИК пастеризатора определенные трудности вызывает энергетический и конструктивный расчет излучателя, связанный с динамикой нагрева жидкости при лучистом теплообмене. Авторами отдельных конструктивных решений аппаратов с

тонкослойным течением жидкости эта задача решалась по-разному [7, 11]. Мощность излучателя, как правило, рассчитывали по известному уравнению энергобаланса без рассмотрения процесса теплообмена между нагревателем и жидким продуктом, что в определенных случаях может привести к неработоспособности проектируемого аппарата.

Разработка единого методологического подхода к решению задачи по определению теплоэнергетических и конструктивных параметров излучателя и камеры пастеризации для ИК пастеризаторов является актуальной задачей.

1.1 Расчет энергетических и конструктивных параметров электрического ИК-излучателя

Целью расчета является определения мощности излучающего элемента, теплоэнергетических и конструктивных параметров ИК-излучателя.

Исходными данными являются производительность установки G , температура поверхности излучателя T_1 , начальная температура жидкого продукта при подаче его в камеру пастеризации $T_{жс}$, некоторые физические свойства обрабатываемой жидкости.

Особенность предлагаемой методики, разработанной совместно с научным сотрудником ГНУ ВИЭСХ Кузьмичевым А.В., заключается в том, что она учитывает процесс теплообмена между ИК нагревателем и сформированным тонким слоем нагреваемого жидкого продукта [14].

Описанные конструкции пастеризаторов по форме составляющих элементов содержат внутреннюю излучающую и внешнюю воспринимающую тепловой поток цилиндрические поверхности. Исходя из этого для расчета энергетических параметров, необходимо рассмотреть процесс взаимного лучистого теплообмена между коаксиально расположенными цилиндрическими поверхностями.

Рассматривая динамику процесса радиационного теплообмена между излучателем и потоком жидкости (жидкий продукт), протекающим тонким слоем по внутренней поверхности цилиндра, принимаем, что внешняя стенка цилиндра теплоизолирована, т.е. отсутствуют теплотери во внешнее пространство и потери тепла от жидкости к наружной цилиндрической стенке пренебрежительно малы. Градиент температур при теплопередаче теплопроводностью в радиальном и осевом направлении потока жидкости мал и его можно не учитывать.

Принимается также одномерное распределение теплоты в направлении движения потока жидкости, т.е. оси x .

Рассматривая элемент поверхности теплообмена длиной dx в соответствии с рисунком 3, уравнение теплового баланса, описывающего изменение температуры протекающей жидкости для элемента dx за время $d\tau$, имеет вид:

$$cF_{жс}\rho_{жс} dxdT_{жс} = qdx d\tau \quad (1)$$

где q – результирующий лучистый поток с единицы длины излучателя, Вт/м; $\rho_{жс}$ – плотность жидкости, кг/м³; c – теплоемкость жидкости, Дж/кг·°С; $F_{жс}$ – площадь сечения слоя жидкости, м²; $T_{жс}$ – температура жидкости, °С, τ – время, с.

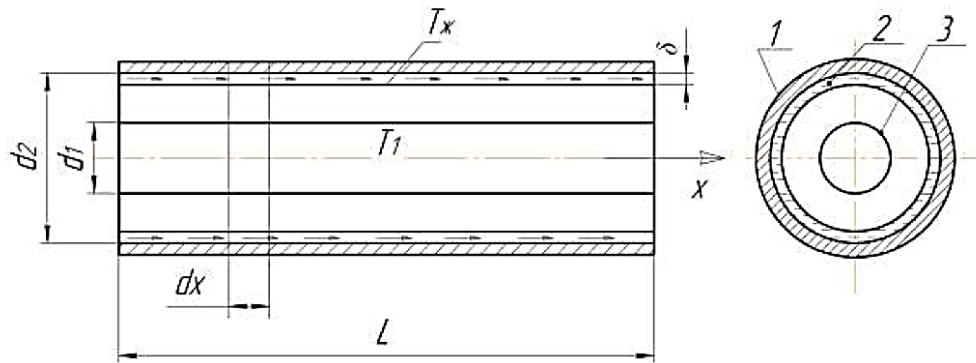


Рисунок 3 – Схема камеры пастеризации: 1– корпус камеры пастеризации, 2– тонкий слой жидкости, 3 – излучатель, d_1 – диаметр излучателя, d_2 – диаметр наружного цилиндра (рабочего пространства)

Принимая во внимание, что скорость движения жидкости $v_{жс} = G / F_{жс}$ и $v_{жс} = dx / d\tau$, а также закон Стефана–Больцмана [15] получили:

$$cGdT_{жс} = \frac{\varepsilon_{np} C_0 F_1 \cdot 10^{-8} (T_1^4 - T_{жс}^4)}{L} dx, 0 \leq x \leq L, \quad (2)$$

где ε_{np} – приведенная степень черноты системы; T_1 – температура излучателя, К; C_0 – излучающая способность черного тела, Вт/м²·К⁴, L – длина излучателя, м; G – расход жидкости, м³/с.

Для системы из двух коаксиальных цилиндров:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{d_1}{d_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (3)$$

где d_1 – наружный диаметр излучателя, d_2 – внутренний диаметр цилиндрической поверхности, по которому протекает жидкость, м.

Учитывая, что $F_1 = \pi d_1 L$ уравнение 2 может быть приведено к виду:

$$\frac{dT_{жс}}{T_1^4 - T_{жс}^4} = \frac{\varepsilon_{np} \pi C_0 d_1 \cdot 10^{-8}}{cG} dx, \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), получим изменение температуры жидкости по длине камеры пастеризации $T_{жс} = f(x)$. Общее решение имеет вид:

$$\frac{1}{2} \frac{\arctg \left(\frac{T_{жс}}{T_1} \right) d}{T_1^3} - \frac{1}{4T_1^3} \left[\ln(T_1 - T_{жс}) - \ln(T_1 + T_{жс}) \right] + C = \frac{\varepsilon_{np} \pi C_0 d_1 \cdot 10^{-8}}{cG} x, 0 \leq x \leq L, \quad (5)$$

где C – произвольная постоянная.

В момент подачи жидкости в камеру пастеризации при $x = 0$ (начальные условия) ее температуру $T_{жс}(0)$ можно принять равной температуре жидкости, выходящей из теплообменника рекуператора, а температуру излучателя $T_1 = 1173K$ можно считать постоянной по всей длине излучателя. Диаметром излучателя и внутренним диаметром наружного цилиндра d_2 на начальном этапе расчета задаются исходя из принятой конструктивно-технологической схемы

установки ($d_1=0,03\dots0,1$ м). Причем d_2 зависит от толщины тонкого слоя δ , производительности установки G , плотности продукта и скорости движения жидкости $v_{жс}$:

$$d_2 = G / (\delta \pi v_{жс} \rho_{жс}) \quad (6)$$

Для установленных начальных условий определяется неизвестная постоянная C . При решении полученного частного уравнения определяется температура продукта $T_{жс}$ на выходе из пастеризационной камеры.

Мощность излучателя P_u , Вт рассчитывается по известному выражению:

$$P_u = c G \rho_{жс} (t_{жск} - t_{жсн}) / \eta_k, \quad (7)$$

где $t_{жск}, t_{жсн}$ – конечная и начальная температура жидкости, °С; η_k – КПД камеры пастеризации.

Полученное уравнение (5.5) позволяет проанализировать влияние переменных d_1, d_2, G на степень нагрева Δt жидкого продукта по длине камеры пастеризации L (или излучателя). Характерные зависимости показаны на рисунках 4 и 5.

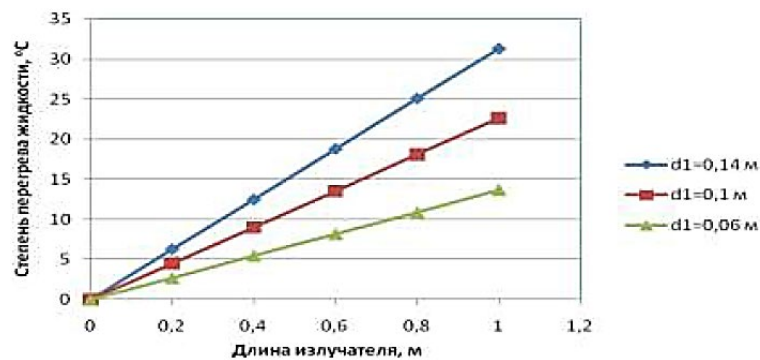


Рисунок 4 – Степень нагрева жидкости в зависимости от диаметра излучателя

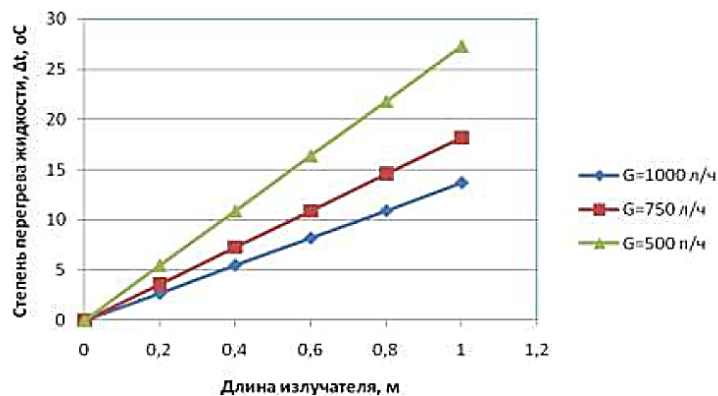


Рисунок 5 – Степень нагрева жидкости в зависимости от производительности установки

В качестве материала излучающего тела для рассматриваемых конструкций излучателей часто используются прецизионные сплавы на основе хрома и никеля (нихром) с высоким электрическим сопротивлением в виде спиралей, зигзагов и т.д. Интегральный коэффициент излучения ε_1 проволок из резистивных материалов находится в довольно широком диапазоне (0,25...0,98) и зависит от степени окисления и гладкости поверхности. Для увеличения ε_1 на поверхности проволоки создают слой окислов, резистивные проволоки выдерживают в течение

нескольких часов при наивысшей допустимой температуре (1200°C). Обработанная таким образом проволока из нихрома имеет коэффициент излучения ε_1 в пределах 0,8...0,98 [16].

Особенностью ИК-пастеризаторов является прямой нагрев продукта без промежуточных теплопередающих элементов, тем самым достигается значительное уменьшение материалоемкости конструкции. Другим определяющим показателем, влияющим на экономичность конструкции, является плотность излучения, позволяющая при меньших габаритных размерах сосредоточить максимальную энергию в зоне нагрева при соблюдении условия не превышения максимальной допустимой удельной нагрузки P_{y0} . Увеличение плотности излучения достигается увеличением навивки спирали. Максимально достижимым является способ навивки «виток к витку». При реализации такого способа возникает требование необходимости обеспечения прочности межвитковой электрической изоляции.

Выбор рабочих параметров излучающего тела состоит в определении диаметра d_{np} и длины l_{np} нагревательной проволоки при заданных значениях электрической мощности P_u , напряжении U и температуре излучателя $T_{изл}$.

Диаметр нагревательного провода рассчитывается по формуле [16]:

$$d_{np} = \sqrt[3]{\frac{4\rho_t P_u^2}{\pi^2 U^2 W_{\text{дон}} n^2}}, \quad (8)$$

где ρ_t – удельное электрическое сопротивление материала излучателя при заданной температуре, Ом·м; U – напряжение на излучателе, В; n – число секций излучателя; $W_{\text{дон}}$ – допустимая поверхностная мощность нагревателя, Вт/м².

$$\rho_t = \rho_{20} k, \quad (9)$$

где ρ_{20} – удельное электрическое сопротивление материала при 20 °С, Ом·м; k – поправочный коэффициент для расчета изменения сопротивления в зависимости от температуры (ГОСТ 12766.1-90) [17].

Для нихромовой проволоки марки сплава Х20Н80-Н диаметром 0,5...3 мм² $\rho_{20} = 1,10 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Для температуры излучателя равной 900°C, $k = 1,024$.

$$W_{\text{дон}} = W_{\text{эф}} \alpha_{\text{эф}}, \quad (10)$$

где $W_{\text{эф}}$ – эффективная удельная поверхностная мощность нагревателей в зависимости от температуры нагреваемой жидкости, Вт/м²; $\alpha_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности излучения.

При температуре жидкости, нагреваемой в камере пастеризации до 80°C и температуре излучателя 900°C $W_{\text{эф}} = 8,6 \cdot 10^4$ Вт/м². Коэффициент эффективности излучения зависит от конструкции и расположения нагревательных элементов излучателя и лежит в диапазоне $\alpha_{\text{эф}} = 0,3 \dots 0,7$ [16].

Полученный размер d_{np} округляют в большую сторону до ближайшей стандартной величины (ГОСТ 12766.1-90).

Общая длина нагревательной проволоки может быть рассчитана по формуле:

$$l_{np} = \sqrt[3]{\frac{P_u U^2}{4\pi\rho_l w_{дон}^2 n}}. \quad (11)$$

Число витков m из нихромовой проволоки в секции:

$$m = l_{np} / (\pi d_s). \quad (12)$$

Длина секции нагрева L_c :

$$L_c = m d_{np} (1 + k_1), \quad (13)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий межвитковое расстояние ($k_1 = 1/3d_{np}$).

Определяющим показателем, влияющим на выбор конструкции излучателя является плотность излучения, позволяющая при меньших габаритных размерах сосредоточить максимальную энергию в зоне нагрева при соблюдении условия не превышения максимальной допустимой удельной нагрузки $W_{дон}$.

Определены два основных типа конструкции излучателя: жаропрочный цилиндр, на который виток к витку намотана нихромовая проволока, как правило, разделенная на секции, следующие друг за другом вдоль продольной оси (рисунок 6 а)); спирали из нихромовой проволоки укладываются внутри кварцевых трубок, которые в виде отдельных секций располагаются по кругу, образуя цилиндр (рисунок 6 б)).

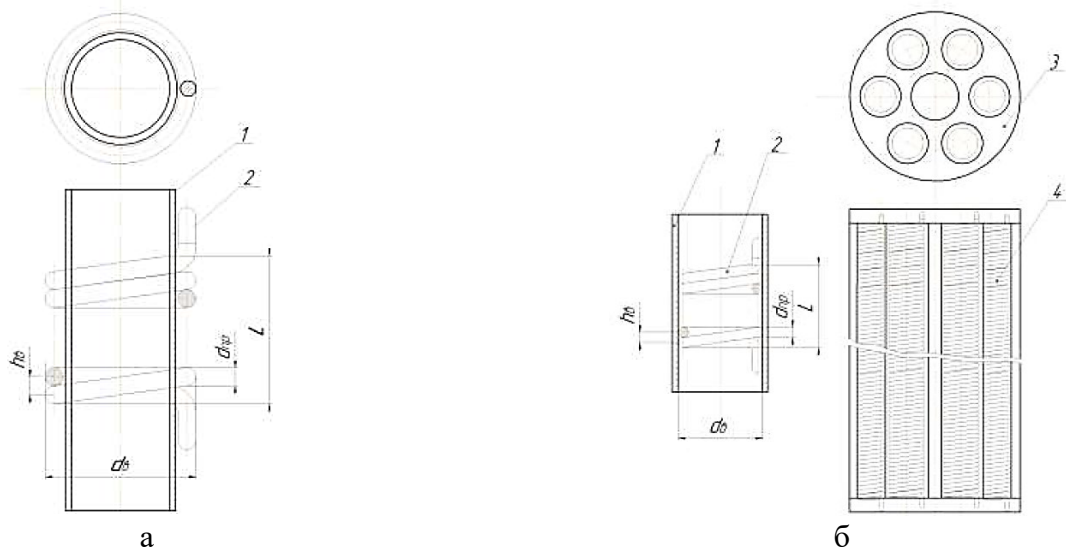


Рисунок 6 – Конструкции излучателей пастеризационной камеры: а) спираль снаружи жаропрочного цилиндра; б) спираль внутри жаропрочного цилиндра (кварц)

В зависимости от выбранной конструкции излучателя расположение отдельных секций нагрева должно быть таким, чтобы они равномерно размещались по всей расчетной длине излучателя L .

1.2 Расчет электрических, теплоэнергетических и конструктивных параметров инфракрасного излучателя для установки пастеризации жидких продуктов в тонком слое производительностью до 1т/ч

Установка предназначена для непосредственного использования на молочных фермах, а также в технологических линиях цехов и предприятий по первичной переработке жидких пищевых продуктов.

Исходные данные: продукт пастеризации – молоко коровье; производительность установки 1000 л/ч; начальная температура молока (после рекуператора) перед пастеризацией $t_{жн} = 65^{\circ}\text{C}$; температура пастеризации $t_{жк} = 76^{\circ}\text{C}$; плотность молока $\rho_{жс} = 1027 \text{ кг/м}^3$; теплоемкость молока $C = 4000 \text{ Дж/кг}\cdot^{\circ}\text{C}$; температура излучателя 900°C ; степень черноты излучателя $\varepsilon_1 = 0,8$; степень черноты молока $\varepsilon_2 = 0,96$.

Цель расчета: определение электрической мощности излучателя, силы тока, его конструктивных параметров, диаметра и длины нагревательного элемента.

При выбранном диаметре излучателя d_1 равным 0,07 м, известных начальных условиях и исходных данных уравнение (5.5) решено в математической системе MathCAD и получена зависимость температуры молока в камере пастеризации от длины излучателя (рисунок 7).

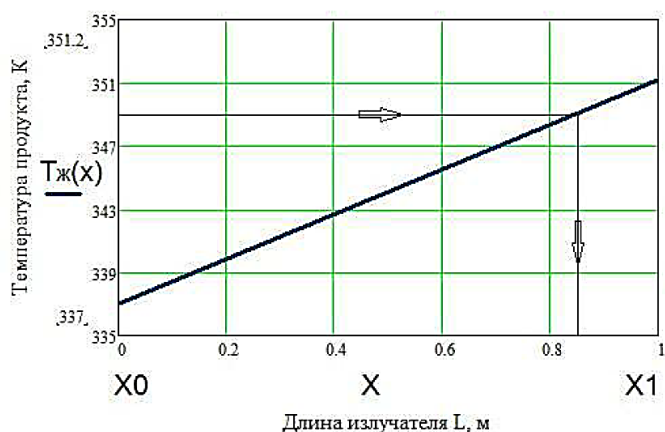


Рисунок 7 – Зависимость температуры молока в камере пастеризации от длины излучателя

По исходным данным температура молока на выходе пастеризационной камеры равна 76°C или 349К. По графику 7 для обеспечения заданной степени нагрева жидкого продукта было определено, что излучатель должен иметь длину $L=0,85\text{м}$.

В таблице 1 приведен расчет излучателя для конструкции типа б) и его сравнение с полученными данными на экспериментальной установке.

Таблица 1 - Расчет ИК-излучателей для установки пастеризации молока производительностью до 1т/ч

Параметр	Эксперимент	Расчет (конструкция рис. 6 б)
Производительность установки, л/ч	1000	1000
Начальная температура молока после теплообменника-рекуператора, $t_{жн}$, $^{\circ}\text{C}$	63	65
Температура пастеризации, $^{\circ}\text{C}$	78	76
Мощность излучателя, $P_{и}$, Вт	14000	12800
Потребляемый электрический ток, I, А	21,2	19,4
Напряжение питания, U, В	380/220	380/220
Допустимая удельная поверхностная мощность электрического нагревателя, Вт/м ²	$3,4 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$

Число секций нагревателя, n	12	12
Материал нагревательной проволоки	X20H80-H	X20H80-H
Удельное электрическое сопротивление проволоки, ρ_l , Ом·м	$1,1410^{-6}$	$1,1410^{-6}$
Расчетный диаметр нагревательной проволоки, d_{np} , мм	0,74	0,74
Ближайший больший стандартный диаметр проволоки, $d_{np.cm}$, мм	0,75	0,75
Расчетная длина нихромовой проволоки, l_{np} , м	13,8	14,1
Диаметр витка нихромовой проволоки, d_g , мм	0,07	0,007
Длина витка нихромовой проволоки, l_g , мм	0,022	0,022
Число витков, m	1055	1060
Длина секции нагревателя, L_c , м	0,82	0,84
Длина активной части излучателя, м	0,82	0,84
Расчетная длина излучателя, L , м	0,84	0,85

Разработанная методика расчета ИК излучателя позволяет определить его энергетические и конструктивные параметры – значение мощности P , потребляемого электрического тока I , степень нагрева жидкого продукта в зависимости от длины излучателя, геометрические размеры излучателя и камеры пастеризации, а также выбрать диаметр, длину, способ укладки и число витков и секций нагревательных элементов исходя из допустимой удельной поверхностной мощности, обеспечивающей нормальные условия их работы.

Полученные расчетным путем энергетические и конструктивные показатели электрического ИК излучателя, как одного из основных элементов установки, позволяют конструировать установку в целом по известным рекомендациям [7] в зависимости от поставленных технологических целей и задач.

Испытания тонкослойного ИК- пастеризатора производительностью до 1 т/ч (рисунок 1) показали, что мощность излучателя составляет около 14 кВт и степень нагрева продукта в камере пастеризации равна 12°C. Расчетные значения составляют, соответственно, 12,8 кВт и 11°C.

На основании разработанной нами методики расчета были получены электрические, теплоэнергетические и конструктивные параметры ИК излучателя для отдельного модуля пастеризационной установки (рисунок 2). Предварительные экспериментальные данные, показали удовлетворительную сходимость с расчетными (таблица 1).

Предложенный новый метод расчета ИК излучателя коаксиального типа, учитывающий динамику процесса теплообмена между электрическим нагревателем и сформированным тонким слоем нагреваемого жидкого продукта, положен в основу разработанной нами методики расчета камеры пастеризации ИК пастеризаторов.

2 Исследование процессов и параметров электротермического оборудования в технологии углубленной обработки комбикормов

Высокая доля комбикормов (свыше 60%) в себестоимости животноводческой продукции вызывает необходимость дальнейшего повышения качества и отдачи их питательного потенциала.

Известно, что в неподготовленном виде усвояемость питательных компонентов комбикорма составляет не более 40...60%.

Для повышения питательной ценности и усвояемости комбикормов используют термомеханические способы углубленной обработки: экструдирования, экспандирования, микронизации, плющения и др.

В них за счет воздействия на продукт температуры, влаги, давления, излучения и других факторов достигаются изменения, способствующие улучшению доступности веществ из трудноусвояемого сырья, стабилизации микрофлоры кишечника, стимуляции пищеварения и снижению токсичности, т.е. повышению поедаемости корма и КПД его использования.

Однако существующие способы углубленной обработки кормов требуют больших затрат электроэнергии (более 100 кВт/ч на 1 тонну продукта). Кроме того, преобразование питательных веществ в них достигается жестким и экстремальным воздействием на продукт потоками энергии высокой плотности, вызывающим не только положительные, но и необратимые отрицательные изменения вещества.

Недостатки «экстремальных» технологий в значительной степени могут быть устранены введением в процесс предварительной гидротермической обработки (ГТО) сырья в реакторах или кондиционерах длительной выдержки [18].

Кроме того, на этапе гидротермической обработки в реакторе комбикорм можно обогатить жидкими добавками, в т.ч. ввести в два раза больше (до 6%) жира без нарушения качества последующих процессов (например, гранулирования).

Гидротермическая обработка в реакторе необходима и для обеззараживания комбикормов.

В России единичные объекты таких технологий представлены техникой ведущих зарубежных фирм, таких как «Амандус Каль» (ФРГ), «Венгер» (США), «Спрут Матадор» (Дания). Необходима разработка качественного отечественного оборудования, т.к. высокая стоимость аналогичного оборудования, поставляемого из-за рубежа, сдерживает широкое внедрение современных технологий.

Основной недостаток известных способов гидротермической обработки (ГТО) – их относительно высокая продолжительность, сопровождающаяся значительными энергозатратами и лимитирующая весь цикл углубленной переработки продукта. Поэтому актуальной задачей является разработка такого способа ГТО, который обеспечивал бы высокую интенсивность тепло- и массообмена и за счет этого позволял сократить продолжительность ГТО, как важнейшего элемента повышения экономичности процесса.

В качестве основного теплоносителя для гидротермической обработки предполагается использовать водяной пар, обладающий высокопотенциальной энергией, инертностью к обрабатываемой среде, способностью увлажнять и подсушивать обрабатываемый продукт.

Исследования процессов влаготепловой обработки комбикорма паром необходимы для обоснования параметров и режимных характеристик этого теплоносителя, разработать исходные требования и теплоэнергетическое оборудование для технологических линий ГТО.

При газомеханическом псевдооживлении, основанном на комбинированном воздействии на слой комбикорма вращающейся механической мешалки и газового потока (пара), скорость и кинетическая энергия давления пара здесь могут быть снижены до минимума, а недостаток энергии для псевдооживления подводимой потоком пара, компенсируется энергией, подводимой вращающейся мешалкой. Она создает пульсирующий гидродинамический режим влаготепловой обработки, который особенно эффективен в слое. При этом снижается расход теплоносителя.

Теплоноситель выбирается из условий, что обработка продукта при атмосферном давлении производится в сравнительно небольшом интервале температур комбикорма, нижний предел которого определяется температурой начала клейстеризации крахмала (65°C), а верхний – температурой испарения жидкости с поверхности продукта (100°C). Эти условия выполняются при применении для обработки в качестве теплоносителя насыщенного водяного пара.

Для исследования процесса влаготепловой обработки комбикорма в псевдооживленном слое [19] в ГНУ ВИЭСХ при совместной работе лабораторий приготовления кормов и комплексной электрификации тепловых процессов была создана экспериментальная установка, состоящая из электрического парогенератора с пароперегревателем и смесителя-кондиционера порционного действия (рисунок 8).

В качестве парогенератора использована, ранее разработанная нами и модифицированная, электрическая установка ЭПВ-36, обеспечивающая производительность по пару 15...45 кг/ч с температурой 100...160°C. Принцип действия смесителя-кондиционера заключается в том, что сначала слой продукта вращением лопастей переводится в псевдооживленное состояние, а затем продувается паром до момента окончания обработки.



Рисунок 8 – Экспериментальная установка для влаготепловой обработки комбикорма: 1 – смеситель-кондиционер порционного действия; 2 – электропароперегреватель; 3 – электрический парогенератор

Исследования процесса влаготепловой обработки комбикорма насыщенным паром атмосферного давления проведены в следующих диапазонах изменения режимных параметров: температура 100...120°C, удельный расход теплоносителя – 0,02...0,16 кг пара/кг комбикорма, разовая загрузка комбикорма – 15 кг, продолжительность обработки паром – 1...4 мин. В опытах использовался комбикорм для откорма КРС К55-25-2-1 РОС.

Для определения основных кинетических закономерностей и характера влияния основных режимных параметров на интенсивность процесса получены и подвергнуты анализу термограммы и кривые увлажнения комбикорма при различных условиях выполнения процесса (рисунки 9 и 10).

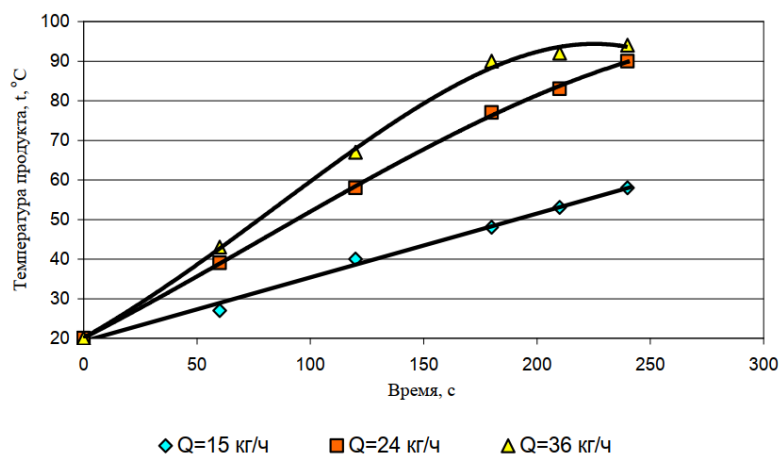


Рисунок 9 –Термограммы комбикорма, обработанного насыщенным паром $t=101...104\text{ }^{\circ}\text{C}$

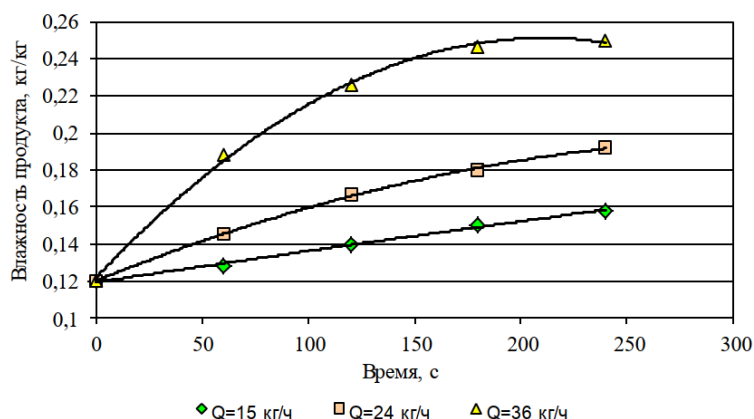


Рисунок 10 – Кривые увлажнения комбикорма насыщенным паром $t=101...104\text{ }^{\circ}\text{C}$

Период прогрева продукта зависит в основном от режимных параметров теплоносителя (расхода, скорости потока, температуры).

Повышение интенсивности подвода тепла способствует ускорению прогрева комбикорма до температуры насыщения (около $100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Повышение температуры пара в пароперегревателе до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызывает небольшой прирост ($2...3\text{ }^{\circ}\text{C}$) температуры комбикорма при обработке, по сравнению с обычным насыщенным паром ($t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Количество влаги, образуемое за счет конденсации пара в период прогрева, достаточно для получения продукта с требуемой конечной влажностью $18...20\%$ (рисунок 10).

Увеличение расхода пара свыше 24 кг/ч в период прогрева приводит к ускоренному проходу пара через слой при незначительном сокращении периода прогрева, после окончания которого увеличение влагосодержания замедляется.

Повышение температуры пара оказывает влияние на конечное влагосодержание продукта при расходе пара свыше 24 кг/ч . Воздействие перегретым до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ паром снижает прирост влаги в продукте за период прогрева на $0,03\text{ кг/кг}$ по сравнению с обычным насыщенным паром. Влияние расхода насыщенного пара на процесс показано на рисунке 11. Учитывая полученные результаты можно констатировать, что способ влаготепловой обработки комбикорма в газомеханически псевдооживленном слое отвечает всем требованиям процесса кондиционирования.

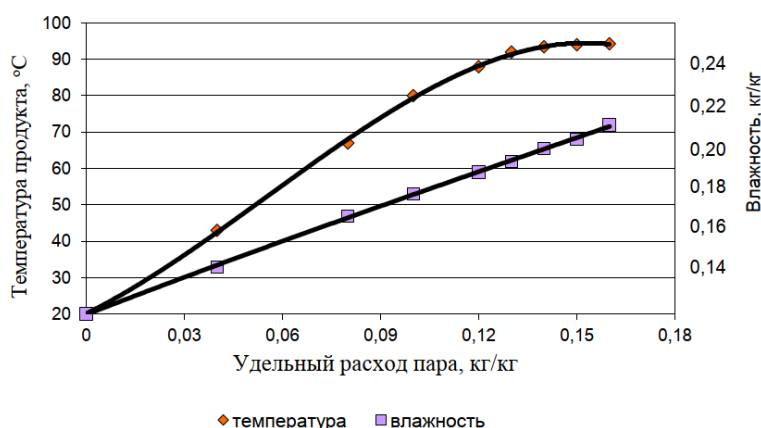


Рисунок 11 – Зависимость температуры и влажности комбикорма от удельного расхода пара

Необходимые его параметры достигаются при обработке слоя комбикорма в активном гидродинамическом режиме насыщенном паром атмосферного давления с удельным расходом равным $0,1\text{ кг пара на кг продукта}$. Периодический характер обработки позволяет регулировать

продолжительность процесса в зависимости от свойств продукта, термодинамических параметров теплоносителя.

Бактериальная обсемененность комбикормов является серьезной проблемой животноводства. Содержащиеся в корме патогенные микроорганизмы вызывают заболевания и падеж животных и птицы, повышают затраты кормов и снижают продуктивность животных.

Одним из перспективных направлений в разработке энергосберегающей технологии теплового обеззараживания является замена горячего воздуха на этапе сушки увлажненного комбикорма другим теплоносителем – перегретым паром. Это приводит, как показывают многочисленные исследования [20], к интенсификации процесса. Кроме того, использование вместо насыщенного пара на этапе нагрева и увлажнения перегретого пара позволяет объединить в одном аппарате такие разнохарактерные процессы, как увлажнение и сушка. Благодаря этому технологический процесс упрощается, сокращается длительность технологического цикла и потребность в оборудовании. Кроме того, перегретый пар, используемый в тепловых процессах обеззараживания, являясь инертным агентом, улучшает качество готового продукта и уменьшает разложение ценных питательных веществ. В этой связи была поставлена задача изучения основных закономерностей процессов тепловой обработки комбикорма перегретым паром и совершенствования на их основе способов и технических средств для теплового обеззараживания рассыпных комбикормов.

Исследования тепловой обработки комбикормов паром низкого давления (до 0,12 МПа) проводили на экспериментальной установке (рисунок 1), состоящей из электрического парогенератора, электропароперегревателя и смесителя-стерилизатора [19]. Принцип действия последнего заключается в том, что сначала слой продукта вращением лопастей переводится в псевдооживленное состояние, а затем продувается паром с целью нагрева комбикорма до температуры обеззараживания. Для получения перегретого пара насыщенный водяной пар нагревался в электрическом пароперегревателе. В опытах использовали комбикорм К58-3-5 РОС для откорма КРС.

Исследование процесса влаготепловой обработки комбикорма перегретым паром низкого давления проведены при следующих параметрах: температура теплоносителя – 120...160°С; расход теплоносителя – $(1,0...1,2) \cdot 10^{-2}$ кг/с; скорость потока теплоносителя – 0,1...0,2 м/с; продолжительность обработки – 1...18 мин.

На основании экспериментальных исследований получены кривые изменения влажности и температуры продукта при различных режимах (рисунки 12, 13).

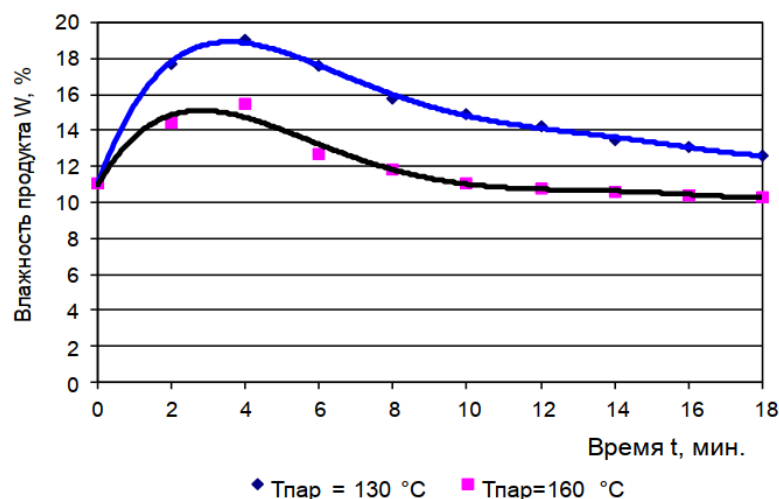


Рисунок 12 – Изменение влажности комбикорма при его обработке перегретым паром

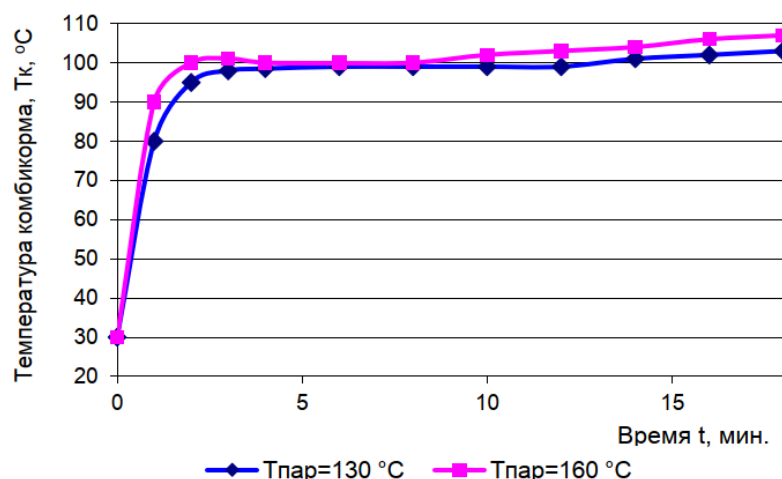


Рисунок 13 – Температура комбикорма при обработке его перегретым паром

Особенностью тепловой обработки комбикорма перегретым паром, в отличие от обработки насыщенным паром, является наличие в кинетике процесса двух характерных периодов: прогрева-увлажнения и сушки продукта. При обработке перегретым паром период прогрева значительно короче, а увлажнение меньше, чем при обработке насыщенным паром. Это объясняется тем, что в первом случае идут одновременно два процесса: прогрев продукта из-за конденсации пара на его поверхности и испарение образовавшегося конденсата из-за высокой температуры теплоносителя.

Разница между температурами отработанного перегретого пара и комбикорма после обработки невелика (около 10...15°C), что свидетельствует о высокой степени использования энергии теплоносителя.

Результаты опытов подтверждают значительное влияние температуры перегретого пара на интенсивность сушки комбикорма. Так, если при температуре перегретого пара 130°C продолжительность сушки до влажности 12,6% составляет 18 мин, то при 160°C – около 7 мин.

Из анализа влияния режимных параметров на процесс термической обработки комбикорма перегретым паром атмосферного давления следует, что повышение температуры пара во всех случаях интенсифицирует процесс сушки и ведет к уменьшению времени обработки.

Температурные кривые, полученные нами по опытным данным в смесителе-стерилизаторе, лежат ниже известного ограничения 110°C, поэтому соответствующие им режимы обработки можно применять без ущерба для качества обрабатываемого комбикорма.

Исходя из выявленных закономерностей, прогрев и сушку комбикорма в подвижном перемешиваемом слое, целесообразно проводить при максимально возможных температурах, которые обеспечивают получение требуемого качества продукта. В проведенных опытах температура комбикорма составила 100°C, а температура теплоносителя (перегретого пара) не менее 150°C.

Выявлены следующие тенденции в совершенствовании технологии влаготепловой обработки комбикормов перед углубленной обработкой: переход к режимам, протекающим при атмосферном давлении; переход от стационарных к активным гидродинамическим режимам обработки продуктов; рациональное осуществление влаготеплового воздействия на продукт во взаимосвязи с гидродинамическим режимом слоя; интенсификация тепло-массообмена между паром и продуктом.

Установлено, что наилучшие результаты процесса могут быть получены при обработке комбикорма паром в псевдооживленном слое, так как при этом тепло и влага подводятся непосредственно к каждой частице продукта.

В качестве теплоносителя для ГТО наиболее целесообразно применять водяной пар с параметрами, представленными в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры водяного пара для гидротермической обработки комбикорма

Параметр теплоносителя	Ед. измерения.	Величина
Диапазон изменения температуры пара	°С	100...160
Рабочее давление пара	МПа	0,07...0,1
Режим подачи пара		периодический, пульсирующий
Влажность пара		Насыщенный, сухой
Расход пара	кг/кг	0,02...0,16

Проведенные исследования легли в основу разработки гидротермического реактора (рисунок 14) нового поколения (руководитель работ: к.т.н. Е.М. Клычев, ответственный за электротеплоэнергетическое оборудование – к.т.н. Д.А. Тихомиров).

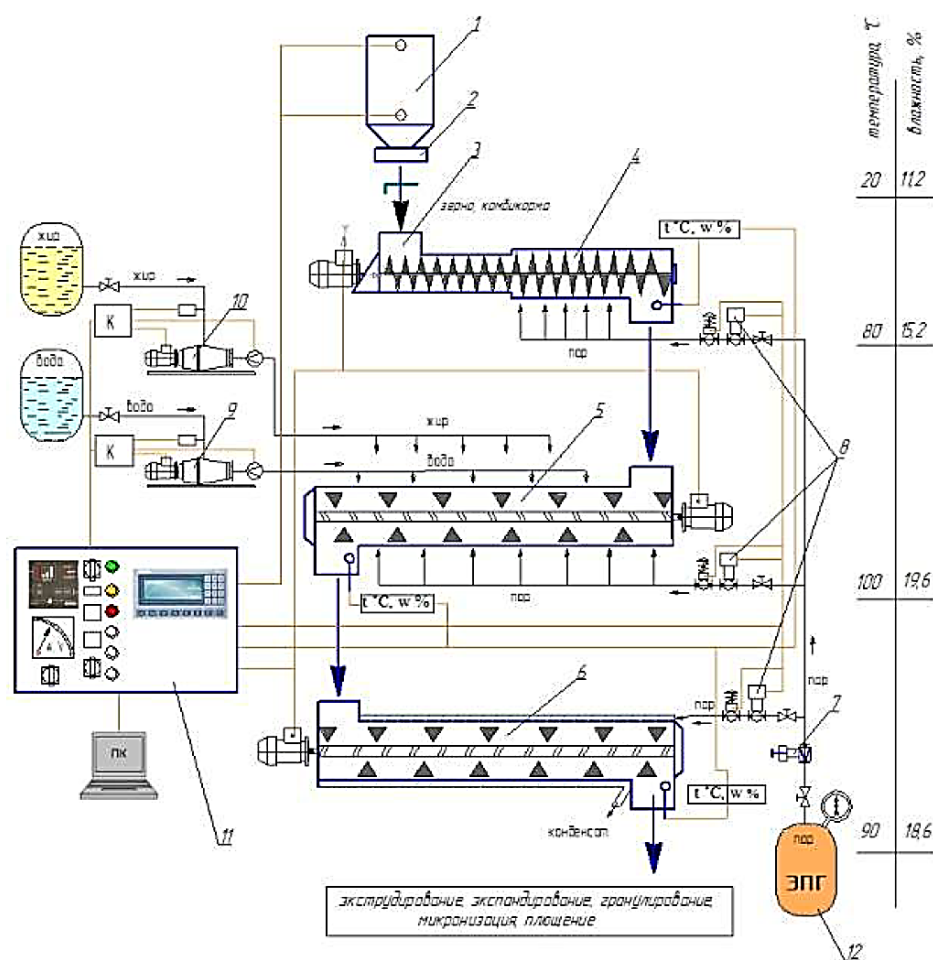


Рисунок 14 – Структурная схема комплекта оборудования гидротермической обработки зерна и комбикорма: 1 – бункер оперативного накопления и хранения обрабатываемого сырья; 2 – выпускной разгрузитель-виброактиватор; 3 – дозировочный узел; 4 – секция нагрева; 5 – секция кондиционирования; 6 – секция выдержки; 7 – модуль редукции давления пара; 8 – модуль дозирования пара; 9 – модуль дозирования воды; 10 – система дозирования жидкости (жира); 11 – электрошкаф управления и регулирования; 12 – автономный электрический парогенератор. t – температура продукта, °С; w – влажность продукта, %; К – контроллеры; ЭПГ – электрический парогенератор.

Принцип работы реактора основан на методе долговременной щадящей влаготепловой обработке корма при умеренной температуре, обеспечивающей оптимальные изменения структурно-механических и физико-химических свойств [20, 21].

Технологический процесс включает следующие термические операции:

- нагрев материала паром до 80°C в плотном слое с периодическим перемешиванием;
- обработка материала в импульсном псевдооживленном слое (ИПС) с импульсным режимом подвода пара и распылению жидкости над слоем с целью ускорения достижения заданного влагосодержания (18...26%), обеспечения равномерности прогрева (до 100°C) и увлажнения;
- выдерживание увлажненного материала в плотном слое с постоянным перемешиванием до полной готовности без дополнительного подвода воды при постоянной температуре.

Способность реактора к рационализации гидротермической обработки, однородному (св. 95%) смешиванию сырья и жидкости повышенной концентрации делает его универсальным и пригодным для использования в широком диапазоне процессов комбикормового производства: экструдирования, экспандирования, микронизации, гранулирования, плющения. Реактор можно использовать для тепловой обработки рассыпного комбикорма, посредством чего минуетея гранулятор и термообработанный комбикорм поступает непосредственно в специальный охладитель рассыпного комбикорма.

Оборудование обеспечивает повышение питательной ценности зерна и комбикормов на 3...8%, снижение вредных и губительных для усвоения антипитательных компонентов корма до 80...85% (в технологиях углубленной обработки), снижение бактериальной обсемененности до норм ПДК, снижение стоимости оборудования в 1,2–1,5 раза по сравнению с импортным. Автоматизированная и высокоточная система дозирования пара и воды обеспечивает снижение их расхода и, как следствие, снижение расхода тепловой энергии на 10...15% по сравнению с аналогами.

На основании теоретических и практических исследований разработаны исходные требования на «Комплект оборудования гидротермической обработки реактором для обеззараживания, кондиционирования и инактивации антипитательных веществ зерна и комбикорма производительностью 3 т/ч.».

Выводы

В результате проведенных исследований с целью повышения энергоэффективности технологических процессов термообработки сельскохозяйственной продукции:

- предложен и апробирован новый метод расчета ИК излучателя коаксиального типа, учитывающий динамику процесса теплообмена между электрическим нагревателем и сформированным тонким слоем нагреваемого жидкого продукта, значительно повышающий точность расчета проектируемой камеры пастеризации для ИК пастеризаторов;
- разработаны предложения по совершенствованию технологии влаготепловой обработки комбикормов перед их углубленной обработкой, обоснованы параметры и режимы работы теплоэнергетического оборудования, позволяющие снизить энергоемкость этих процессов;
- разработаны исходные требования на «Комплект оборудования гидротермической обработки реактором для обеззараживания, кондиционирования и инактивации антипитательных веществ зерна и комбикорма производительностью 3 т/ч.»

Список литературы

1. Тихомиров Д.А. Энергосберегающие электрические системы и технические средства теплообеспечения основных технологических процессов в животноводстве: дис. ...доктор. техн. наук: 05.20.02 / Тихомиров Дмитрий Анатольевич. – Москва, 25. – 342 с.
2. Сыроватка В.И. Ресурсосбережение при производстве комбикормов в хозяйствах // Техника и оборудование для села. – 21,– №6 (168) – С. 22–25.
3. Шувалов А.М., Зазуля А.Н., Машков А.Н., Набатов К.А. Экспериментальные исследования саморегулируемой системы энергоподвода к варочным аппаратам многоцелевого агрегата // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 22. – Т.3.– С. 12–17.
4. Резник Е.И. Кормоцехи на фермах / – М.: Россельхозиздат, 1980. – 181 с.
5. Кукта Г.М. Технология переработки и приготовления кормов / – М.: Колос, 1978. – 240 с.
6. Оболенский Н.В., Булатов С.Ю., Свистунов А.И. Смеситель-ферментер для кормов // Сельский механизатор. – 24.– №4(62).– С. 26–27.
7. Елисеев Н.Н., Карумидзе Г.И. Методические рекомендации по расчету установок для электротермической обработки жидких сред / – М., ВИЭСХ, 1979. – 25 с.
8. Патент № 31729 Устройство для обработки жидкости облучением в тонком слое. / В.А. Чапурин, С.Н. Карпов, Ф.В. Пальмов Ф.В. Опубл. 30. 10. 1994г.
9. Летаев С.А. Обоснование параметров установки обеззараживания молока на фермах ультрафиолетовым и инфракрасным излучением: диссертация. кандидата технических наук: 05.20.02; – М. 22.– 145 с.
10. Кузьмичев А.В., Малышев В.В., Тихомиров Д.А. Эффективность комбинированной пастеризации молока УФ и ИК облучением // Светотехника, 20. – №5. – С. 6-9.
11. Карумидзе Г.И. Исследование процесса электротермической обработки жидких сельскохозяйственных продуктов ИК излучением в потоке: автореф. дис. канд. техн. наук. 05.20.02; М. 1980, ВИЭСХ.– 15 с.
12. Официальный сайт компании ООО НПП «Дайри» [Электронный ресурс] <http://www.dairy.kharkov.com>.
13. Кузьмичев А.В., Летаев С.А., Малышев В.В., Тихомиров Д.А. Комбинированный способ пастеризации молока ИК и УФ излучением // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. Труды 7-й Международной научно-технической конференции. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 20. – Ч3.– С. 255-261.
14. Тихомиров Д.А., Кузьмичев А.В. Расчет инфракрасного излучателя электрической установки для пастеризации жидких продуктов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 23. – №5. – С. 14–17.
15. Погребняк М.П. Совершенствование системы содержания молочного скота в Западной Сибири: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 06.02.04; – Новосибирск, 1998. – 39 с.
16. Никонов Н.В. Нагреватели. Методика и примеры расчета // ООО «Метотехника». – 22. – 29 с., <http://www.metotech.ru>.
17. ГОСТ 12766.1-90. Проволока из прецизионных сплавов с высоким электрическим сопротивлением.
18. Клычев Е.М., Тихомиров Д.А., Карташов С.Г., Мансуров Х.А. Влаготепловая обработка комбикорма перед экспандированием // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – №1. – С. 19-21.

19. Клычев Е.М., Тихомиров Д.А., Карташов С.Г., Мансуров Х.А. Кинетические характеристики обработки комбикорма перегретым паром // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 2. – С. 15–17.
20. Клычев Е.М. Интенсивное кондиционирование зерна и комбикормов // Комбикорма. – 2009. – №8, С. 37–38.
21. Клычев Е.М. Обработка зерна и комбикормов в реакторе-кондиционере // Комбикорма. – 20. – №7. С. 41–42.