

Научные и прикладные аспекты процесса дефростации гидробионтов в поле ТВЧ

Антипов Сергей Тихонович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Адрес: 394036, город Воронеж, проспект Революции, дом 19

E-mail: ast@vsuet.ru

Шахов Сергей Васильевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Адрес: 394036, город Воронеж, проспект Революции, дом 19

E-mail: aero-vgtu@yandex.ru

Ряжских Виктор Иванович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Адрес: 394018, город Воронеж, ул. Плехановская, дом 11

E-mail: s_shahov@mail.ru

Ключников Андрей Иванович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Адрес: 394036, город Воронеж, проспект Революции, дом 19

E-mail: kaivanov@mail.ru

Среди различных способов консервирования рыбы и нерыбных водных объектов промысла одним из лучших, высокоэффективных и наиболее распространенных в настоящее время является холодильная обработка, обеспечивающая максимальное сохранение нативных свойств продукта. Большой объем получения замороженных гидробионтов на рыболовческих судах требует при использовании их для переработки и реализации в торговле совершенных способов дефростации. Критерием дефростации является не только полное и быстрое размораживание, но и обеспечение восстановления основных свойств ткани продукта после этого процесса. Традиционно гидробионты размораживают, в основном, в воздушной (паровоздушной) и жидкой средах. Способы, основанные на теплопередаче от воды или воздуха с теплофизической точки зрения не совершенны, так как процесс длительный из-за того, что теплопроводность оттаявшей части продукта значительно меньше замороженной и это же является причиной неравномерности температуры по поверхности и в толще блока. Поэтому, перспективными способами являются методы дефростации с использованием объемных видов подвода энергии различными энергетическими полями. При прохождении токов высокой и сверхвысокой частоты через продукт электрическая энергия превращается в тепловую. В этом случае, теплота выделяется по всей толще продукта, происходит нагрев всего блока, причем с большой скоростью. Следует отметить, что достаточно развернутое математическое описание процесса дефростации в поле ТВЧ либо отсутствует, либо представлено частным описанием. Известные научные работы отечественных и зарубежных ученых, достигнутые практические результаты отражают, преимущественно, узкое решение той или иной технологической задачи, применительно к конкретной конструкции аппарата или установки для высокочастотной обработки.

Ключевые слова: гидробионты; дефростация; высокочастотный нагрев; токи высокой частоты; моделирование; математическая модель

Введение

На сегодняшний день пищевая рыбная продукция, производимая из замороженных блоков, является наиболее востребованной и составляет около

65...75% от общего количества перерабатываемого рыбного сырья (Satoshi Noguchi F, 1999. P. 9 – 11)

Тем не менее, следует отметить актуальность использования энергоэффективных процессов переработки рыбного сырья, а также их интенсификацию при щадящем воздействии

на продукт. Речь идет, прежде всего, об электрофизических методах воздействия, в частности, полей токов высокой частоты (Bing Li, 2002, p. 175 – 182, Lorentzen G., 1980, p. 163 – 166, Зайцев, 1976, Воробьев, 1988, с. 1 – 2, Рогов, 1983).

Применение токов высокой частоты в различных отраслях пищевой и перерабатывающей промышленности в последнее время значительно возросло. Этому способствовали все возрастающие требования к качеству и безопасности производимой продукции, а также неуклонная потребность в использовании приоритетных энергоэффективных процессов, позволяющих обеспечить значительные успехи в технологическом обновлении и модернизации всего производства. Сегодня уже можно привести примеры технологии сушки, термической обработки, дефростации в поле токов высокой частоты с различным аппаратным оформлением, подтверждающие целесообразность проводимых научных и прикладных исследований в данной области (Перфилова, 2019, с. 132 – 133, Рогов, 1996, Рушиц, 2014, с. 9 – 15, Ушакова, 2013, с. 30 – 32). Большое количество работ посвящено анализу качества готовой продукции, производимой с использованием полей токов высокой частоты, исследованию процессов и явлений при взаимодействии обрабатываемого продукта и электромагнитного поля, изучению специфики теплообмена в поле токов высокой частоты (Воробьев, 2004, Арсланов, 2010, с. 56 – 57, Головин, 1997, Миклашевский, 1999, с. 47 – 48).

В современной технике, в основном, используют два варианта обработки продукции в поле токов высокой частоты (Архангельский, 2011, с. 5 – 15, Архангельский, 2012, с. 34 – 37, Воробьев, 1994, с. 43 – 46).

1. Индукционное нагревание материала со свойствами проводников с использованием магнитного поля.
2. Нагревание материала со свойствами диэлектриков с использованием электрического поля.

Материалы и методы исследования

На основании проведенного аналитического обзора литературных данных в качестве объектов экспериментальных исследований для дефростации было выбрано рыбное сырье с различными физико-химическими свойствами (размер, масса, содержание белка, жира и т.д.):

обыкновенная килька, сельдь, скумбрия, треска, кальмар.

Для того, чтобы определить диэлектрическую

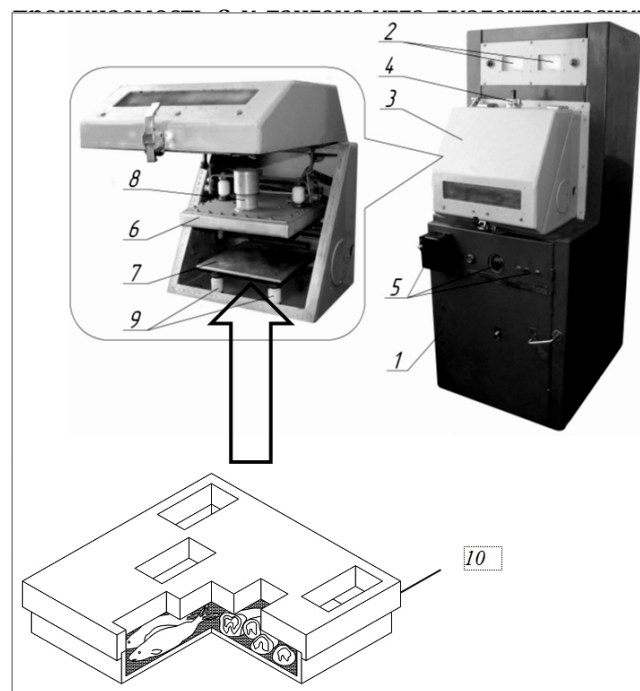


Рисунок 1. Установка для исследования процесса размораживания гидробионтов в поле ТВЧ:

1 – изолированный корпус; 2 – измерительные приборы; 3 – рабочая камера; 4 – регулировочный винт; 5 – пульт управления; 6 – высокопотенциальный электрод; 7 – низкочастотный электрод; 8 – лампа; 9 – изоляторы; 10 – емкость с образцами гидробионтов.

Для проведения эксперимента была изготовлена емкость размером 30x30x20 мм, с толщиной стенки 4 мм из фторопласта. Данный материал выбран из соображений минимальности $\text{tg} \delta$ угла потерь, т.е. этот материал практически электронейтрален к высокочастотному излучению.

Сверху емкости накрываются крышками, выполненными из диэлектрика, в качестве которого использовался эбонит. При этом для проведения имитации адресного воздействия токами высокой частоты использовались крышки с выполненными в них отверстиями различной формы и расположения, моделирующие соответственные электроды.

Замороженные образцы гидробионтов поочередно размещались в емкости и накрывались крышками с отверстиями. После этого пилотную емкость помещали в рабочую камеру, между высоко- и низкочастотными электродами. Крышка

рабочей камеры закрывалась и с помощью регулировочного винта устанавливалось требуемое расстояние между электродами для создания требуемой напряженности электромагнитного поля (Чирков, 2010).

Развернутое математическое описание процесса дефростации в поле ТВЧ либо отсутствует, либо представлено частным описанием. Известные научные работы отечественных и зарубежных ученых, достигнутые практические результаты отражают, преимущественно, узкое решение той или иной технологической задачи, применительно к конкретной конструкции аппарата или установки для высокочастотной обработки (Антипов, 2002, с. 50 – 57, Лысова, 2003, с. 237 – 240, Резинов, 2011, с. 163 – 167).

В нашем случае, наиболее близко к описанию процессов отопления и плавления в блочных продуктах с использованием ТВЧ являются математические модели, описывающие процессы нагревания и плавления кусков шоколада для получения шоколадной глазури. При создании математической модели размораживания гидробионтов в поле ТВЧ использовали соответствующие корректировки, связанные со свойствами продукта, а также были сделаны допущения об асимметричности температурного поля и отсутствия теплообмена с окружающей средой через фидерные пластины, ввиду их размещения в рабочей камере.

Наибольший практический интерес представлял способ дефростации рыбного сырья в поле токов высокой частоты при непрерывном движении несущей ленты конвейера (Пат. №2328125 РФ

Установка непрерывной ТВЧ-дефростации продуктов в блоках). Причем мощность электродных пластин увеличивалась от периферии к центру (см. рис. 2 и 3).

Схема расположения электродных пластин на несущей ленте конвейера, иллюстрирует техническую задачу изобретения по патенту №2328125, т.е. установка непрерывной ТВЧ-дефростации замороженных продуктов в блоках, включает пары верхних и нижних пластинчатых электродов 4 прямоугольной формы с автономным питанием каждой пары от отдельных генераторов различной мощности, которую можно устанавливать таким образом, чтобы мощность воздействия на блоки излучения каждой пары электродов уменьшалось от центра к периферии блоков, конвейер 5 состоит из пластин, изготовленных из диэлектрического материала, под которым размещены нижние электроды в виде отдельных пластин.

Над конвейером 5 расположена рабочая камера установки, к потолку которой подвешены верхние электрод, причем верхние и нижние электроды 4 в зоне их воздействия на блок 6 продукта, размещенные на конвейере 5, устанавливают таким образом, чтобы пара электродов с максимальной мощностью находилась над центральной частью блока, а последующие пары электродов с уменьшающейся мощностью смещены по ходу конвейера на длину электрода, а по ширине блока с возможностью расположения на расстоянии, превышающего зоны действия краевых эффектов электромагнитного поля, образованного верхними и нижними электродами (рис. 3).

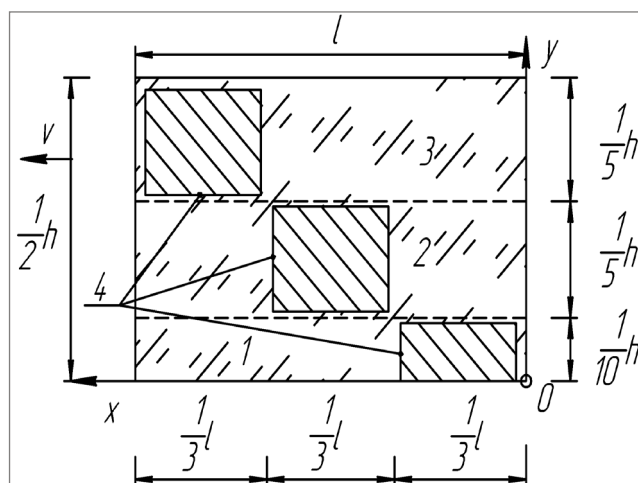
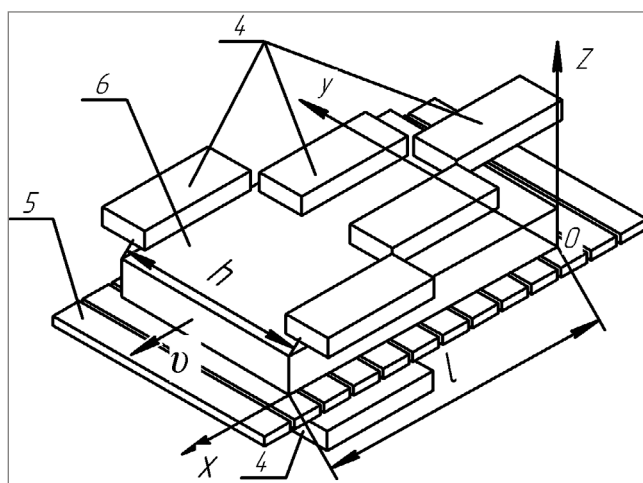


Рисунок 2. Схема расположения электродных пластин на несущей ленте конвейера: 1, 2, 3 – элементы образцов рыбного сырья; 4 – электродные пластины; 5 – несущая лента конвейера; 6 – замороженный образец рыбного сырья.

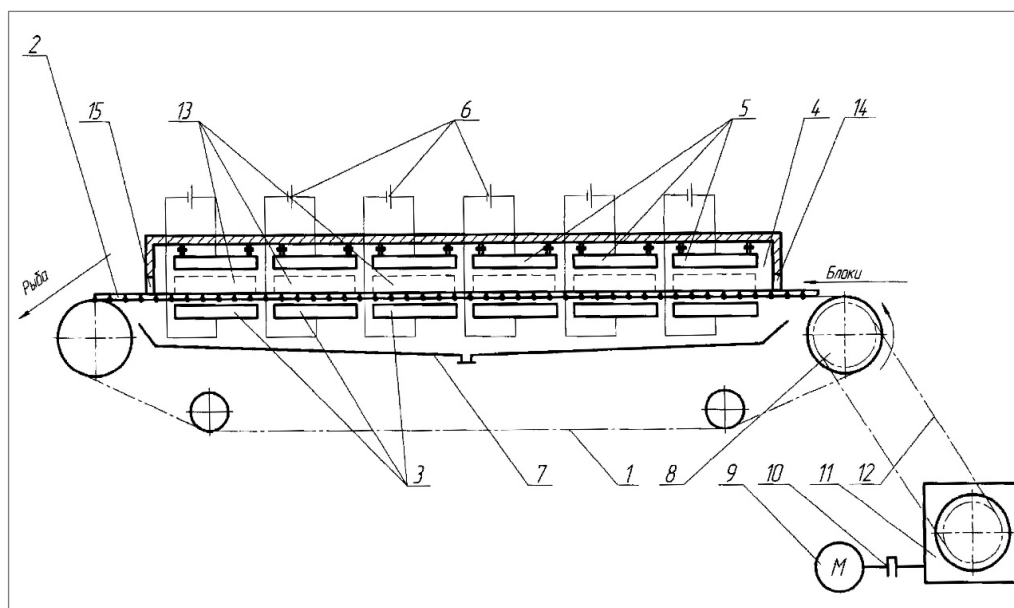


Рисунок 3. Схема установки непрерывной ТВЧ-дефростации продуктов в блоках.

В рамках математического моделирования ТВЧ-размораживания ввиду незначительных отличий криоскопических температур пресноводных рыб ($-0,5 \dots -1,0^\circ\text{C}$) и морских рыб и гидробионтов ($-0,8 \dots -2,2^\circ\text{C}$) делаем допущение о том, что во всем диапазоне температур размораживания коэффициент температуропроводности, плотность, теплопроводность, теплоемкость практически постоянны.

На основании рис. 2 и 3 запишем уравнение теплопроводности:

$$c_p \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + Q, \quad (1)$$

где τ – текущее время, с; x, y, z – декартовы координаты, м; c_p, ρ, λ – теплоемкость, плотность и теплопроводность среды, Дж/(кг·К), кг/м³, Вт/(м·К); Q – тепловой поток, Вт/м³; $t = t(x, y, z, \tau)$ – температура, К.

Если поделить обе части уравнения (1) на $c_p \rho$, получим

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q, \quad (2)$$

где $a = \lambda / (c_p \rho)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с², $q = Q / (c_p \rho)$ – интенсивность нагрева рыбного сырья, К/с.

На основании принятой расчетной схемы (см. рис. 1), температура в направлении оси z не меняется,

т.е. $t \neq t(z)$, тогда из (2) вытекает равенство

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q, \quad (3)$$

Полагаем о постоянстве скорости поступления замороженных блоков в зону электродных пластин. В этом случае, $\partial t / \partial \tau = v \partial t / \partial x$ и (3) переписывается

$$v \frac{\partial t}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q, \quad (4)$$

Выбранная геометрия взаимного положения электродных пластин определяет специфику создаваемых ими полей температур, поэтому, зону термообработки замороженного рыбного сырья можно представить в виде некоторой совокупности составляющих ее элементов. В этом случае, уравнение (4) для отдельного элемента будет выглядеть:

элемент 1

$$v \frac{\partial t_1}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial y^2} \right) + q_1; \quad (5)$$

элемент 2

$$v \frac{\partial t_2}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial y^2} \right) + q_2; \quad (6)$$

элемент 3

$$v \frac{\partial t_3}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 t_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_3}{\partial y^2} \right) + q_3. \quad (7)$$

Следует отметить о локальном распределении объемных источников тепла. В этом случае, величины q_1 , q_2 , и q_3 будут являться функцией координаты x . На основании вышесказанного, уравнения (5), (6) и (7) переписутся:

для элемента 1

$$q_1(x) = q_1 \left[1(x) - 1\left(x - \frac{1}{3}l\right) \right]; \quad (8)$$

для элемента 2

$$q_2(x) = q_2 \left[1\left(x - \frac{1}{3}l\right) - 1\left(x - \frac{2}{3}l\right) \right]; \quad (9)$$

для элемента 3

$$q_3(x) = q_3 \left[1\left(x - \frac{2}{3}l\right) - 1(x-l) \right], \quad (10)$$

где $1(\dots)$ – односторонняя функция Хэвисайда [14].

На основании (8)...(10) уравнения (5)...(7) переписутся:

$$v \frac{\partial t_1}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial y^2} \right) + q_1 \left[1(x) - 1\left(x - \frac{1}{3}l\right) \right], \quad (11)$$

$$v \frac{\partial t_2}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial y^2} \right) + q_2 \left[1\left(x - \frac{1}{3}l\right) - 1\left(x - \frac{2}{3}l\right) \right], \quad (12)$$

$$v \frac{\partial t_3}{\partial x} = a \frac{\partial^2 t_3}{\partial y^2} + q_3 \left[1\left(x - \frac{2}{3}l\right) - 1(x-l) \right], \quad (13)$$

Если начальная температура замороженного блока рыбного сырья, подаваемого в зону термообработки t_0 , то

$$t_1(0, y) = t_2(0, y) = t_3(0, y) = t_0, \quad (14)$$

Очевидно, что при выходе размороженного блока рыбного сырья из зоны термообработки нет теплового потока, тогда запишем

$$\frac{\partial t_1(l, y)}{\partial x} = \frac{\partial t_2(l, y)}{\partial x} = \frac{\partial t_3(l, y)}{\partial x} = 0, \quad (15)$$

Т.к. рассматриваемая задача симметрична, то

$$\frac{\partial t_1(x, 0)}{\partial y} = 0, \quad (16)$$

Полагаем, что на концевых участках электродных пластин 1 и 2 тепловые потоки равны, т.е.

$$\frac{\partial t_1\left(x, \frac{1}{10}h\right)}{\partial y} = \frac{\partial t_2\left(x, \frac{1}{10}h\right)}{\partial y}, \quad (17)$$

Аналогично для концевых участков электродных пластин 2 и 3

$$\frac{\partial t_2\left(x, \frac{3}{10}h\right)}{\partial y} = \frac{\partial t_3\left(x, \frac{3}{10}h\right)}{\partial y}, \quad (18)$$

Полагаем, что теплообмен с окружающей средой через поверхности электродов отсутствует в силу их расположения в рабочей камере ТВЧ-установки, поэтому

$$\frac{\partial t_3\left(x, \frac{h}{2}\right)}{\partial y} = 0, \quad (19)$$

Полагаем, что поля температур непрерывны, тогда

$$t_1\left(x, \frac{1}{10}h\right) = t_2\left(x, \frac{1}{10}h\right), t_2\left(x, \frac{3}{10}h\right) = t_3\left(x, \frac{3}{10}h\right), \quad (20)$$

Полученная система уравнений (11) – (20) представляет собой математическое описание непрерывного процесса дефростации рыбного сырья в поле токов высокой частоты.

Упростим систему уравнений (11) – (13), введя предположение о том, что интенсивность переноса тепла вдоль оси x существенно превосходит перенос тепла вдоль оси y , тогда

$$v \frac{\partial t_1}{\partial x} = a \frac{\partial^2 t_1}{\partial y^2} + q_1 \left[1(x) - 1\left(x - \frac{1}{3}l\right) \right], \quad (21)$$

$$v \frac{\partial t_2}{\partial x} = a \frac{\partial^2 t_2}{\partial y^2} + q_2 \left[1\left(x - \frac{1}{3}l\right) - 1\left(x - \frac{2}{3}l\right) \right], \quad (22)$$

$$v \frac{\partial t_3}{\partial x} = a \frac{\partial^2 t_3}{\partial y^2} + q_3 \left[1\left(x - \frac{2}{3}l\right) - 1(x-l) \right], \quad (23)$$

а граничные условия (14) – (20) переписем в виде

$$t_1(0, y) = t_2(0, y) = t_3(0, y) = t_0, \quad (24)$$

$$\frac{\partial t_1(x, 0)}{\partial y} = 0, \quad (25)$$

$$\frac{\partial t_1\left(x, \frac{1}{10}h\right)}{\partial y} = \frac{\partial t_2\left(x, \frac{1}{10}h\right)}{\partial y}, \quad (26)$$

$$\frac{\partial t_2\left(x, \frac{3}{10}h\right)}{\partial y} = \frac{\partial t_3\left(x, \frac{3}{10}h\right)}{\partial y}, \quad (27) \quad \text{температур электродных пластин, т.е.}$$

$$\frac{\partial t_3\left(x, \frac{h}{2}\right)}{\partial y} = 0, \quad (28) \quad T_1 = T_1(1, Y, Pe, W_1, W_2, W_3), \quad (41)$$

$$t_1\left(x, \frac{1}{10}h\right) = t_2\left(x, \frac{1}{10}h\right), \quad (29) \quad T_2 = T_2(1, Y, Pe, W_1, W_2, W_3), \quad (42)$$

$$t_2\left(x, \frac{3}{10}h\right) = t_3\left(x, \frac{3}{10}h\right), \quad (30) \quad T_3 = T_3(1, Y, Pe, W_1, W_2, W_3), \quad (43)$$

Перепишем (21) – (30) преобразуем в безразмерный вид:

$$X = x/l, \quad Y = 2y/h, \quad T_{1,2,3} = (t_{1,2,3} - t_0)/t_0, \quad Pe = h^2 v / 4al, \\ W_{1,2,3} = q_{1,2,3} v / t_0 l$$

т.е.

$$\frac{\partial T_1}{\partial X} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 T_1}{\partial Y^2} + W_1 \left[1(X) - 1\left(X - \frac{1}{3}\right) \right], \quad (31) \quad \text{Введем следующие обозначения}$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial X} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 T_2}{\partial Y^2} + W_2 \left[1\left(X - \frac{1}{3}\right) - 1\left(X - \frac{2}{3}\right) \right], \quad (32) \quad F_1(W_1, W_2, W_3) = (\bar{T}_1 - \bar{T}_2)^2, \quad (45)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial X} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^2 T_3}{\partial Y^2} + W_3 \left[1\left(X - \frac{2}{3}\right) - 1(X-1) \right], \quad (33) \quad F_2(W_1, W_2, W_3) = (\bar{T}_1 - \bar{T}_3)^2, \quad (46)$$

$$T_1(0, Y) = T_2(0, Y) = T_3(0, Y) = 0, \quad (34) \quad \text{На основании вышесказанного задача оптимизации будет представлена в следующем виде}$$

$$\frac{\partial T_1(X, 0)}{\partial Y} = 0, \quad (35) \quad F_3(W_1, W_2, W_3) = (\bar{T}_2 - \bar{T}_3)^2, \quad (47)$$

$$\frac{\partial T_1\left(X, \frac{1}{5}\right)}{\partial Y} = \frac{\partial T_2\left(X, \frac{1}{5}\right)}{\partial Y}, \quad (36) \quad \Phi(W_1, W_2, W_3) = \sum_{i=1}^3 F_i(W_1, W_2, W_3) \rightarrow \min,$$

$$\frac{\partial T_2\left(X, \frac{3}{5}\right)}{\partial Y} = \frac{\partial T_3\left(X, \frac{3}{5}\right)}{\partial Y}, \quad (37) \quad \text{которая эквивалентна задаче решения системы алгебраических уравнений}$$

$$\frac{\partial T_3(X, 1)}{\partial Y} = 0, \quad (38) \quad \begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial W_1} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial W_2} = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial W_3} = 0. \end{cases}, \quad (48)$$

$$T_1\left(X, \frac{2}{5}\right) = T_2\left(X, \frac{2}{5}\right), \quad (39)$$

$$T_2\left(X, \frac{3}{5}\right) = T_3\left(X, \frac{3}{5}\right), \quad (39)$$

Таким образом, распределение температурного поля зависит от следующих величин

$$T = T(X, Y, Pe, W_1, W_2, W_3).$$

Практический интерес представляет значение

Проведем идентификацию поля температур, а затем перейдем к W_1, W_2, W_3 .

В этом случае уравнения (1) – (6) будут выглядеть:

$$\theta_1 = \frac{t_1(x, \tau) - t_{01}}{t_{01} - t_{02}} = \frac{K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \left(1 + \frac{1}{K_\varepsilon} \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_1 \tau}} \right), \quad (49)$$

при $x > 0$;

$$\theta_2 = \frac{t_2(x, \tau) - t_{02}}{t_{01} - t_{02}} = \frac{K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} \operatorname{erfc} \frac{|x|}{2\sqrt{a_2\tau}}, \quad (50)$$

при $x < 0$, где

$$K_\varepsilon = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}}.$$

Т.к. $\lambda_1 = \lambda_2$, $a_1 = a_2$, то $K_\varepsilon = 1$, уравнения (7), (8) примут вид

$$\theta_1 = \frac{t_1(x, \tau) - t_{01}}{t_{01} - t_{02}} = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right), \quad (51)$$

$$\theta_2 = \frac{t_2(x, \tau) - t_{02}}{t_{01} - t_{02}} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \frac{|x|}{2\sqrt{a_2\tau}}, \quad (52)$$

Проведем анализ следующего уравнения

$$\lambda \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = k[t_1(x_0, \tau) - t_2(x_0, \tau)],$$

где x_0 – расстояние от координаты соприкосновения двух тел.

Уравнение (10) перепишем в безразмерном виде

$$\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial X} \right|_{X=0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{X^2}{4Fo}\right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \Big|_{X=0} = \frac{1}{2\sqrt{\pi Fo}}$$

откуда

$$\lambda \frac{\partial \theta_1(0, \tau)}{\partial x} = k[\theta_1(x_0, \tau) - \theta_2(x_0, \tau) + 1],$$

получим

$$\lambda \frac{\partial \theta_1(0, \tau)}{\partial x} = k \left(1 + \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) = 2k\theta_1(x_0, \tau),$$

вводя число Фурье $Fo = a_1\tau/x_0^2$, получим

$$\frac{\partial \theta_1(0, Fo)}{\partial X} = K \left(1 + \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \right), \quad (53)$$

$$\text{где } K = \frac{2kx_0}{\lambda}, \quad X = x/x_0$$

Вычислим:

$$\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial X} \right|_{X=0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{X^2}{4Fo}\right) \cdot \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \Big|_{X=0} = \frac{1}{2\sqrt{\pi Fo}}$$

Подставляя в (11):

$$K = \frac{1}{2\sqrt{\pi Fo}} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{1}{2\sqrt{Fo}} \right)^{-1}.$$

Для выбора значения Фурье можно использовать величину продолжительности пребывания замороженного блока рыбного сырья в зоне термообработки $\tau^* = l/v$, а $x_0 = h/10$.

Результаты исследования

При исследовании зависимостей диэлектрической проницаемости гидробионтов от температуры, тангенса угла диэлектрических потерь от температуры, фактора поглощения от температуры использовались частоты 13,56; 27,12; 40,68 и 81,37 МГц. Выбор рабочей частоты ТВЧ-воздействия зависел, главным образом, от исходных свойств гидробионтов и содержания в них влаги. Так, например, высокие значения диэлектрической проницаемости на низких частотах (13,57...27,12 МГц) и при высокой массовой доле влаги объясняется тем, что в дипольной ориентации учувствуют не только полярные молекулы волн, но и большие диполи коллоидных частиц, чего не наблюдается при высоких частотах (40,68...81,37 МГц). Электрофизические свойства продуктов с высокой добротностью в диапазоне частот 10...20 МГц изменяются незначительно. Наиболее выгодным с точки зрения затрат энергии на нагревание при осуществлении ТВЧ-дефростации гидробионтов будет выбор более низкой частоты электромагнитного поля 13,56 МГц. В случае проведения ТВЧ-дефростации в интенсивном режиме и малой продолжительности потребуется и более высокая частота электромагнитного излучения – 81,37 МГц. В результате проведения экспериментальных исследований выявлены следующие закономерности изменения температур образцов рыбного сырья в зависимости от продолжительности воздействия токов высокой частоты при частоте 81,37 МГц.

Анализ полученных кривых (рис. 4) показал появление в ходе дефростации рыбного сырья местных множественных участков с жидкостью, которые постепенно разогревались и продвигались по всему объёму продукта. Выявлено, что рыбное сырье с меньшим содержанием влаги и большим содержанием жира имеет меньшую продолжительность дефростации. Этому способствовало большое содержание невымороженной влаги, что приводило к избыточному выделению тепла в процесс дефростации в поле токов высокой частоты (Дакуорта, 1980, Лысова, 2002, с. 147 – 149).

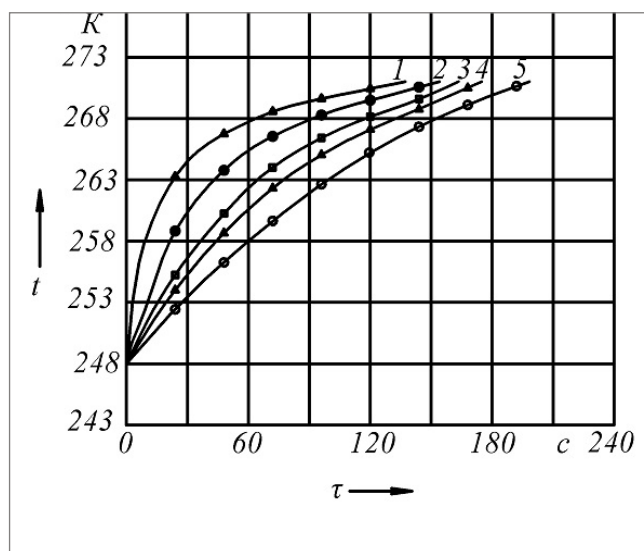


Рисунок 4. Закономерность изменения температуры образцов рыбного сырья в зависимости от продолжительности воздействия токов высокой частоты при частоте 81,37 МГц: 1 – скумбрия; 2 – сельдь; 3 – килька; 4 – треска; 5 – кальмар.

Для выявления закономерности воздействия токов высокой частоты на замороженные образцы рыбного сырья в направлении от центра к периферии были использованы следующие конструкции крышек изоляторов с различной формой и расположением отверстий (рис. 5). Более того, имитировали динамическое воздействие токов высокой частоты на замороженные образцы рыбного сырья, используя различное расположение отверстий в крышках изоляторов (Пат. №2328125 РФ Установка непрерывной ТВЧ-дефростации продуктов в блоках).

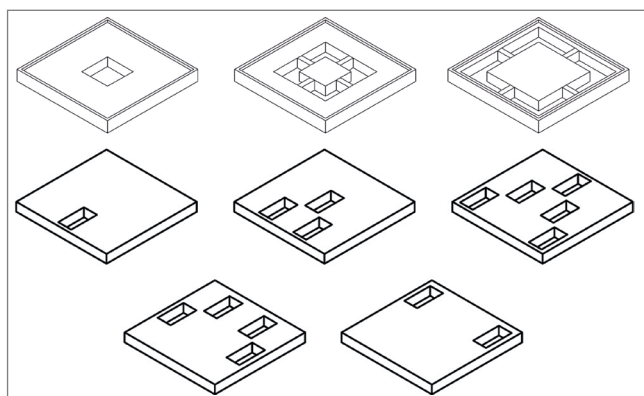


Рисунок 5. Конструкции крышек изоляторов.

В результате выполнения экспериментальных

исследований получены температурные кривые при дефростации рыбного сырья в зависимости от продолжительности воздействия токов высокой частоты при уменьшающейся напряженности электромагнитного поля в направлении от центра к периферии: 1 – $E = 68,57$ кВ/м; 2 – $E = 53,3$ кВ/м; 3 – $E = 43,6$ кВ/м (рис. 6).

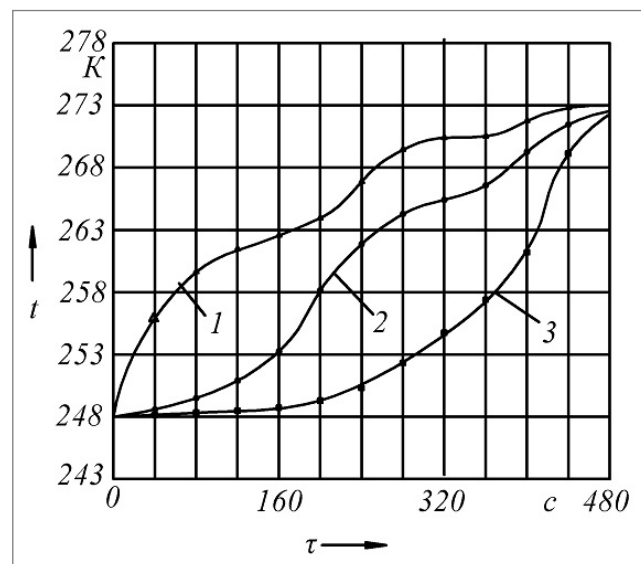


Рисунок 6. Закономерности изменения температуры образцов рыбного сырья в зависимости от продолжительности воздействия токов высокой частоты при различной напряженности электромагнитного поля.

Было выявлено явление локального увеличения температур размороженных образцов рыбного сырья, вплоть до существенного перегрева, наблюдаемого при $E = 68,57$ кВ/м и выше.

Обсуждение

Выявленные закономерности позволили сделать вывод о реальных возможностях применения полей токов высокой частоты при дефростации рыбного сырья. В результате дефростации гидробионтов в поле ТВЧ может оказаться, что отдельные части продуктов будут размороженными, а другие еще не размороженными. Такое состояние является следствием неравномерной тепловой обработки продуктов в рабочих камерах ТВЧ и СВЧ-установок, т.к. процесс дефростации происходит в поле стоячей волны. Поэтому, равномерный нагрев продуктов, особенно при их дефростации является актуальной проблемой, стоящей перед конструкторами ТВЧ и СВЧ-техники.

Заключение

Однако, в нашем случае, математическая модель ТВЧ-размораживания блоков гидробионтов разработана для случая их непрерывной подачи по конвейеру, что обеспечивает равномерный прогрев по всему объему блока (Пат. №2328125 РФ Установка непрерывной ТВЧ-дефростации продуктов в блоках).

В процессе выполнения экспериментов выявлено, что на продолжительность дефростации в значительной степени влияют следующие факторы: физико-химический состав рыбного сырья, размеры замороженных блоков, напряженность электромагнитного поля, характер движения замороженных блоков рыбного сырья в поле токов высокой частоты.

В ходе работы также было выявлено, что при дефростации рыбного сырья в поле токов высокой частоты, по сравнению с обычным градиентным способом, жир, содержащийся в продукте, был подвержен окислению и гидролизу в меньшей степени, в сравнении с традиционными методами размораживания. Более того, малая продолжительность воздействия токов высокой частоты на продукт обеспечивала и малую денатурацию белка, что позволяло сохранить высокую пищевую ценность обрабатываемого рыбного сырья при ТВЧ-размораживании гидробионтов, характер и степень дополнительного изменения жиров имеют незначительные величины, прежде всего из-за низкой температуры в блоке после размораживания, малой продолжительности нагрева, степени воздействия на жир воды и воздуха. Данные условия существенно отличаются от размораживания блоков в жидкой среде (пресной воде, растворах поваренной соли).

Эффективность применения ТВЧ-нагрева во многом определяется степенью однородности свойств размораживаемых гидробионтов. Цвет рыбы, размороженной в условиях ТВЧ, соответствует цвету свежего рыбного сырья. Различия в изменении pH, содержании гликогена и водосвязывающей способности показали, что гликолитические процессы в рыбном сырье обычного размораживания протекают несколько быстрее, чем в гидробионтах, обработанных токами высокой частоты.

Исследование качественных показателей размороженных гидробионтов показало, что ТВЧ-дефростация позволяет исключить нежелательные изменения, имеющие место при традиционном методе размораживания (в жидкой среде на основе пресной воды и растворов поваренной соли). На качество размороженных гидробионтов существенно влияют их свойства к моменту замораживания, скорость замораживания, температура и продолжительность хранения. Вследствие необратимых изменений некоторых качественных показателей в период замораживания и последующего хранения исходные свойства рыбного сырья полностью не восстанавливаются даже при оптимальных условиях размораживания.

Преимущества этого способа особенно очевидны при неполном размораживании до температур, обеспечивающих оптимальные условия его последующей обработки. Для ограничения опасности чрезмерного повышения температур на поверхности рыбных блоков можно путем циркуляции воздуха с отрицательной температурой или разбрызгиванием криогенной жидкости

Таблица 1

Технологические параметры процесса дефростации рыбного сырья в поле токов высокой частоты и показатели качества размороженной продукции

Показатели	Рыбное сырье				
	Килька	Сельдь	Скумбрия	Треска	Кальмар
Продолжительность, ч	0,11	0,12	0,12	0,14	0,16
Влага, %	74,3	62,7	72,5	76,6	78,1
Общий азот х 6,25, %	15,5	16,2	19,1	19,5	20,3
Липиды, %	6,0	6,1	6,8	2,8	1,3
Азот небелковый, %	0,42	0,36	0,27	0,29	0,22
Азот белковый, %	1,94	2,16	2,51	2,40	2,90
pH	6,7	6,8	7,0	7,1	7,2
Микробиальная обсемененность, КОЕ/г	4,9x10 ⁵	4,7x10 ⁵	5,8x10 ⁵	4,3x10 ⁵	3,6x10 ⁵
Потери массы, %	0,16	0,29	0,35	0,23	0,14

в дефростерах. Тем не менее, для надежного

внедрения такого процесса в существующие рыбоперерабатывающие производства необходимо постоянно совершенствовать конструктивное оформление установок токов высокой частоты и их элементов, а также находить компромисс между параметрами электрофизического воздействия и технологическими свойствами получаемой размороженной продукции.

Литература

- Антипов С. Т., Шишов Е. А., Казарцев Д. А. Влияние значений напряженности электромагнитного поля на процесс диэлектрической сушки семян кориандра // Хранение и переработка сельхозсырья. 2002. № 9. С. 50 - 51.
- Арсланов Ш. Влияние электрофизических воздействий на технологический процесс хлебопечения // Хлебопродукты. 2010. №11. С. 56 - 57.
- Архангельский Ю. С. Сверхвысокочастотная электротехнология. Саратовская школа электротехнологов // Вестник СГТУ. 2011. №4. Вып. 3. С. 5 - 15.
- Архангельский Ю. С., Огурцов К. Н. Высокотемпературный нагрев диэлектриков с фазовыми переходами // Вестник СГТУ. 2012. №2с (66). С. 34 - 37.
- Вода в пищевых продуктах / под ред. Дакуорта Р. Б. М.: Пищевая промышленность, 1980. 575 с.
- Воробьев В. В. Обработка гидробионтов СВЧ-нагревом и управление качеством продукции: монография. М.: Франтера, 2004. 356 с.
- Воробьев В. В. Прогрессивные СВЧ-технологии обработки гидробионтов // Рыбное хозяйство. 1994. № 1. С. 43 - 46.
- Воробьев В. В., Коротков В. К. Применение СВЧ-агрегата А1-ФДВ для размораживания рыбы в блоках // Экспресс-информация ВНИИСлегпишемаш: сер. оборудование для продовольственных отраслей промышленности (выпуск 1). 1988. С. 1 - 2.
- Воробьев, В. В. Промышленное применение СВЧ-установки для размораживания рыбы // Рыбное хозяйство. 1988. № 11. С. 83 - 85.
- Головин А. Н. Контроль производства и качества продуктов из гидробионтов. М.: Колос, 1997. 254 с.
- Лысова В. Н., Бурцева Е. П., Львова Н. В. (Дульгер Н. В.) Исследование динамики процессов и оборудования при дефростации: материалы научно-технической конференции АГТУ. Астрахань, 2002. С. 147 - 149.
- Лысова В. Н., Дульгер Н. В. Оптимизация процесса размораживания оросительных дефростеров на основе математического моделирования // Высоко-эффективные пищевые технологии, методы и средства их реализации: сборник научных трудов всероссийской научно-технической конференции выставки. М.: МГУПП, 2003. С. 237 - 240.
- Миклашевский В. М. Динамический метод обеспечения равномерности СВЧ-размораживания мяса // Хранение и переработка сельхозсырья. 1999. № 2. - С. 47 - 48.
- Об одной модели ТВЧ-нагрева многослойных материалов / Резинов В. Г. [и др.] // Известия АлтГУ. 2011. № 12. С. 163 - 167.
- Опыт применения СВЧ-энергии при производстве пищевых продуктов / Н. Ф. Ушакова [и др.]. // Пищевая промышленность. 2013. № 10. С. 30 - 32.
- Перфилова О. В., Магомедов Г. О. Преимущество применения СВЧ-нагрева в переработке тыквенных выжимок // Новые технологии. 2019. №1 С. 132 - 133.
- Рогов И. А., Бабакин Б. С., Выгодин В. А. Электрофизические методы в холодильной технике и технологии. Москва: Изд-во Колос, 1996. 326 с.
- Рогов И. А., Малютин А. Ф., Джангиров А. П. Современные способы размораживания мяса // Обзорная информация ЦНИИТЭИмясморпром. Сер. Холодильная промышленность и транспорт. Москва. 1983. 24 с.
- Рушиц А. А., Щербакова Е. И. Применение СВЧ-нагрева в пищевой промышленности и общественном питании // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2014. Т. 2. № 1. С. 9 - 15.
- Технология обработки водного сырья / В.П. Зайцев [и др.]. Москва: Изд-во Пищевая промышленность, 1976. 696 с.
- Установка непрерывной ТВЧ-дефростации продуктов в блоках: пат. 2328125 Рос. Федерация. № 2007106337/13 / Антипов С. Т., Шахов С. В., Чирков А. А., Степыгин А. А., Баранов А. Ю., Рязских Э. В.; заявл. 19.02.07; опубл. 10.07.08; Бюл. № 19. 9 с.
- Чирков А. А. Совершенствование процесса размораживания гидробионтов в поле ТВЧ: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12: Воронеж, 2010. 182 с.
- Bing Li, Da-Wen Sun. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods // Journal of Food Engineering. 2002. V. 54 (3). P. 175 - 182.
- Lorentzen G. Thawing of frozen meat and fish for subsequent industrial processing // Z. Lebensmitt - Technol. - und - Verfahrenstech. 1980. V. 31. № 4. P. 163 - 166.
- Satoshi Noguchi F. Sea bass and redfin // Reito-Refrigeration. 1999. V. 74. № 861. P. 9 - 11.

Scientific and Applied Aspects of the Hydrobionts Defrostation Process in the HDTV Field

Sergey T. Antipov

*Voronezh State University of Engineering Technologies
19, Revolution Avenue, Voronezh, 394036, Russian Federation
E-mail: ast@vsuet.ru*

Sergey V. Shakhov

*Voronezh State University of Engineering Technologies
19, Revolution Avenue, Voronezh, 394036, Russian Federation
E-mail: aero-vgtu@yandex.ru*

Victor I. Ryazhskikh

*Voronezh State University of Engineering Technologies
11, Plekhanovskaya str., Voronezh, 394018, Russian Federation
E-mail: s_shahov@mail.ru*

Andrey I. Klyuchnikov

*Voronezh State University of Engineering Technologies
19, Revolution Avenue, Voronezh, 394036, Russian Federation
E-mail: kaivanov@mail.ru*

Among the various methods of preserving fish and non-fish water objects, one of the best, highly effective and most common at present is refrigeration processing, which ensures maximum preservation of the product's native properties. The large volume of production of frozen hydrobionts on fishing vessels requires using them for processing and selling advanced defrosting methods in trade. The defrosting criterion is not only complete and rapid defrosting, but also ensuring the restoration of the basic properties of the product tissue after this process. Traditionally, hydrobionts are thawed, mainly in water, by immersion or irrigation, in a stream of warm saturated air, as well as in still air. Methods based on heat transfer from water or air from a thermophysical point of view are not perfect, since the process is long due to the fact that the thermal conductivity of the thawed part of the product is much less than the frozen one and this is the reason for the temperature unevenness on the surface and in the thickness of the block. Therefore, promising methods are defrosting methods using volumetric types of energy supply by various energy fields. When high-current and ultra-high-frequency currents pass through the product, electrical energy is converted into heat. In this case, heat is released throughout the entire thickness of the product, the entire block is heated, and at a high speed. It should be noted that a sufficiently detailed mathematical description of the defrosting process in the HDTV field is either absent or is presented in a private description. The well-known scientific works of domestic and foreign scientists, the practical results achieved reflect mainly a narrow solution of a particular technological problem, as applied to a specific design apparatus or installation for high-frequency processing.

Keywords: hydrobionts; defrostation; high-frequency heating; high-frequency currents; modeling; mathematical model

References

- Antipov S. T., Shirshov E. A., Kazarcev D. A. Vliyanie znachenij naprya-zhennosti elektromagnitnogo polya na process dielektricheskoy sushki semyan koriandra [The effect of electromagnetic field strength on the process of dielectric drying of coriander seeds] *Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ya* [Storage and processing of agricultural raw materials], 2002, no 9, pp. 50 - 51.
- Arslanov SH. Vliyanie elektrofizicheskikh vozdeystvij na tekhnologicheskij process hlebopecheniya [The influence of electrophysical effects on the technological process of baking] *Hleboprodukty* [Bread products], 2010, no 11, pp. 56 - 57.
- Arhangel'skij YU.S., Ogurcov K.N. Vysokotemperaturnyj nagrev dielektrikov s fazovymi perekhodami [High-temperature heating of dielectrics with phase transitions] *Vestnik SGU* [Bulletin of the Saratov

- State Technical University], 2012, no 2s (66), pp. 34 - 37.
- Arhangel'skij YU. S. Sverhvyssokochastotnaya elektrotekhnologiya. Sara-tovskaya shkola elektrotekhnologov [Microwave Electrotechnology. Saratov School of Electrotechnologists] Vestnik SGTU [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2011, vol. 3. no 4, pp. 5 - 15.
- Voda v pishchevyh produktah [Water in food products] pod red. Dakuorta
R. B. Moscow: Pishchevaya promyshlennost', 1980. 575 p.
- Vorob'ev V. V. Obrabotka gidrobiontov SVCH-nagrevom i upravlenie ka-chestvom produktsii [Microwave processing of aquatic organisms and product quality management]. Moscow: Frantera, 2004, 356 p.
- Vorob'ev V. V., Korotkov V. K. Primenenie SVCH-agregata A1-FDV dlya razmora-zhivaniya ryby v blokah [Application of the A1-FDV microwave unit for de-frosting fish in blocks] Ekspres-informatsiya VNIISlegpishchemash: ser. obo-rudovanie dlya prodovol'stvennykh otraslej promyshlennosti [Express infor-mation by All-Union Scientific Research Institute of Light Food Engineering: ser. equipment for food industries], 1988, issue 1, pp. 1 - 2.
- Vorob'ev V. V. Progressivnye SVCH-tekhnologii obrabotki gidrobiontov [Progres-sive microwave technologies for processing hydrobionts] Rybnoe hozyajstvo [Fisheries], 1994, no 1, pp. 43 - 46.
- Vorob'ev, V. V. Promyshlennoe primeneniye SVCH-ustanovki dlya razmo-razhivaniya ryby [Industrial application of a microwave installation for defrosting fish] Rybnoe hozyajstvo [Fisheries], 1988, no 11, pp. 83 - 85.
- Golovin A. N. Kontrol' proizvodstva i kachestva produktov iz gidrobiontov [Control of the production and quality of products from hydrobionts]. Moscow: Kolos, 1997. 254 p.
- Lysova V. N., Dul'ger N. V. Optimizatsiya processa razmorazhivaniya oro-sitel'nykh defrosterov na osnove matematicheskogo modelirovaniya [Optimization of the process of defrosting irrigation defrosters based on mathematical modeling] Vysoko-effektivnye pishchevye tekhnologii, metody i sredstva ih realizatsii: sbornik nauchnykh trudov vsrossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii vystavki [Highly effective food technologies, methods and means for their implementation: a collection of scientific papers of the All-Russian scientific and technical conference of the exhibition]. Moscow: Moscow State University of Food Industry, 2003, pp. 237 - 240.
- Lysova V. N., Burceva E. P., L'vova N. V. (Dul'ger N. V.) Issledovanie dinamiki processov i oborudovaniya pri defrostatsii [Study of the dynamics of processes and equipment during defrosting] Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii AGTU. Astrahan' [Materials of the scientific and technical conference of the Astrakhan State Technical University. Astrakhan, 2002, pp. 147 - 149.
- Miklashevskij V. M. Dinamicheskiy metod obespecheniya ravnomernosti SVCH-razmorazhivaniya myasa [A dynamic method for ensuring uniformity of microwave defrosting of meat] Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya [Storage and processing of agricultural raw materials], 1999, no 2, pp. 47 - 48.
- Ob odnoy modeli TVCH-nagreva mnogoslojnykh materialov [About one model of high-frequency heating of multilayer materials] Rezinov V. G. [i dr.] // Izvestiya AltGU [News of Altai State University], 2011, no. 12, pp. 163 - 167.
- Opyt primeneniya SVCH-energii pri proizvodstve pishchevykh produktov [The experience of using microwave energy in food production] N. F. Ushakova [i dr.]. Moscow: Food industry, 2013, no. 10. pp. 30 - 32.
- Perfilova O. V., Magomedov G. O. Preimushchestvo primeneniya SVCH-nagreva v pererabotke tykvennykh vyzhimok [The advantage of using microwave heating in the processing of squeeze squeezed] Novye tekhnologii [New Technologies], 2019, no 1, pp. 132 - 133.
- Rogov I. A., Malyutin A. F., Dzhangirov A. P. Sovremennyye sposoby raz-morazhivaniya myasa [Modern methods of meat thawing] Obzornaya informatsiya CNIITEImyasmolprom. Ser. Holodil'naya promyshlennost' i transport [Central Research Institute of Information and Technical and Economic Research of the Meat and Dairy Industry]. Moscow. 1983. 24 p.
- Rogov I. A., Babakin B. S., Vygodin V. A. Elektrofizicheskie metody v holodil'noy tekhnike i tekhnologii [Electrophysical methods in refrigeration engineering and technology]. Moscow: Kolos, 1996. 326 p.
- Rushchik A. A., SHCHerbakova E. I. Primeneniye SVCH-nagreva v pishchevoj pro-myshlennosti i obshchestvennom pitanii [Application of microwave heating in the food industry and public catering] Vestnik YUzhno-Ural'skogo gos. un-ta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii [Bulletin of the South Ural State University Series: Food and Biotechnology.]. 2014, T. 2, no. 1, pp. 9 - 15.
- Tekhnologiya obrabotki vodnogo syr'ya [Technology of processing water raw materials] V. P. Zajcev [i dr.]. Moscow: Food Industry Publishing House, 1976. 696 p.
- Ustanovka nepreryvnoy TVCH-defrostatsii produktov v blokah [Installation of continuous high-frequency defrosting of products in blocks]: Pat. 2328125 Rus-

- sian Federation. IPC A23B 4/07.No 2007106337/13.
 Antipov S. T., Shakhov S. V., Chirkov A. A., Stepygin A. A., Baranov A. Yu., Ryazhskikh E. V.; ap-plicant and patent holder Voronezh State Technological Academy; declared 19.02.07; publ. 07.10.08; bulletin no. 19.
- Chirkov A. A. Sovershenstvovanie processa razmorazhivaniya gidrobiontov v pole TVCH: dis. ... kand. tekhn. nauk:[Improvement of the process of defrosting hydrobionts in the HDTV field: PhD thesis] Voronezh, 2010. 182 p.
- Bing Li, Da-Wen Sun. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods // Journal of Food Engineering. 2002. V. 54 (3). P. 175 - 182.
- Lorentzen G. Thawing of frozen meat and fish for subsequent industrial proc-essing // Z. Lebensmitt - Technol. - und - Verfarenstech. 1980. V. 31. № 4. P. 163 - 166.
- Satoshi Noguchi F. Sea bass and redfin // Reito-Refrigeration. 1999. V. 74. № 861. P. 9 - 11.