

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.12>

УДК: 621.317.335.3; 537.868.3; 53.096; 53.083.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ПРОЦЕССЕ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

А.В. Коннов, Г.А. Белозеров, В.А. Сотсков

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности –
филиал «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН,
127422, Москва, ул. Костякова, 12

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2026 г.

Аннотация. Рассмотрен новый резонансный метод определения диэлектрических свойств замороженных биологических тканей при температурах от -20 до -1°C в диапазоне частот 100–200 МГц в условиях фазовых переходов входящей в их состав вымороженной воды. Для проведения резонансных измерений разработана специальная резонаторная измерительная ячейка. Данный метод апробирован на примере водного льда, приготовленного из дистиллированной воды, диэлектрическая проницаемость которого хорошо известна. Проведены также измерения в диапазоне частот 100–200 МГц диэлектрических параметров спинки замороженной морской форели и проведено сравнение полученных данных с ранее опубликованными.

Ключевые слова: несовершенный диэлектрик, замороженная биоткань, диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери, тангенс угла диэлектрических потерь, фазовые переходы, электромагнитные волны, очень высокие частоты, резонаторная измерительная ячейка.

Финансирование: исследование выполнено в рамках Государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН № FGUS-2025-0004.

Автор для переписки: Коннов Александр Викторович,
konnov.alexander@mail.ru

Введение

Большой интерес к исследованиям диэлектрических свойств замороженных объектов (биологические ткани, пищевые продукты, водный лед и т.д.) в области криоскопических температур в диапазоне очень высоких частот (ОВЧ) электромагнитных волн (ЭМВ) обусловлен стремлением повысить эффективность установок нагрева и дефростации, использующих безградиентные методы теплопередачи. Существующие сегодня промышленные установки дефростации, основанные на передаче тепловой энергии ЭМВ, используют в 90 % случаев две основные частоты: в диапазоне высоких частот (ВЧ) – 27 МГц и в диапазоне ультравысоких частот (УВЧ) – 915 МГц. Если ВЧ дефростеры отличаются высоким качеством размораживаемого продукта и относительно большой продолжительностью разогрева (десятки минут), то УВЧ установки разогрев осуществляют за считанные минуты, но при этом не обеспечивают равномерный нагрев с минимальным разбросом температуры [1].

Опыт эксплуатации данных установок показывает, что кардинально разрешить данное противоречие в рамках диапазонов ВЧ и УВЧ невозможно без дорогостоящих технических усложнений существующих конструкций. Решение этой проблемы возможно при переходе к диапазону ОВЧ ЭМВ 100–200 МГц, обеспечивающему в условиях фазовых переходов качественный нагрев замороженных продуктов (большая глубина проникновения и равномерность), присущий ВЧ установкам, при скорости объемного нагрева приближающейся к скоростям нагрева в УВЧ дефростерах.

Для определения оптимальных параметров ОВЧ технологических установок: рабочей частоты и мощности источников излучения по критериям производительность/цена, условий технологической обработки продуктов электромагнитным полем (тип облучения: импульсный или непрерывный, время облучения, скорость движения конвейерной ленты для установок конвейерного типа) при размораживании и нагреве, необходимо знать диэлектрические характеристики замороженных биотканей [2]. Исследованиями [3] показано, что диэлектрические свойства замороженных биотканей в большей степени зависят

от изменения температуры, чем от изменения частоты ЭМВ. Так, диэлектрическая проницаемость (ДП) может увеличиваться на порядок во время оттаивания замороженной биоткани при приближении к криоскопической температуре [4]. При повышении температуры выше криоскопической, вследствие теплового разупорядочивания молекул, ДП, как правило, уменьшается, но в некоторых случаях (особенно на радиочастотах) может возрасти, если в образце имеется достаточная концентрация солей, которая активирует механизм ионной поляризации [5].

Данные по значениям ДП замороженных пищевых продуктов в диапазоне ОВЧ имеют разрозненный характер, так практически отсутствуют данные в области температур от -5 до -1 °С (область криоскопических температур), в которой при размораживании наиболее интенсивно протекают процессы фазового перехода связанной воды из твердого состояния в жидкое. Поэтому одной из целей работы являлись исследования диэлектрических свойств биотканей применительно к диапазону ОВЧ при температурах, характерных для их холодильной обработки.

В радиочастотном диапазоне электромагнитных длин волн, в частности в его высокочастотной части (выше 100 МГц), применяются различные методы измерений диэлектрических свойств жидких и твердых диэлектриков, которые можно разделить на две группы: контактные и бесконтактные. К контактному методу относятся: использование конденсатора в виде параллельных пластин (импедансный метод) [4], метод коаксиального зонда [6–11]. К бесконтактным методам можно отнести: измерения в открытом или закрытом резонаторе (резонансный метод) [3, 12, 13], использование линий передачи [7–10], облучение диэлектрических образцов с помощью антенн в свободном пространстве [7, 10]. С точки зрения воздействия на измеряемый диэлектрик, методы измерения делятся на разрушающие и неразрушающие.

Перечисленные методы измерения ДП веществ хорошо отработаны и дают приемлемые по точности результаты в однофазных и однородных средах, например, импедансный метод – в диапазоне частот ниже 30 МГц, а другие,

наоборот, в сверхвысокочастотном диапазоне частот (выше 300 МГц). При наличии фазового перехода, сопровождаемого изменением агрегатного состояния вещества внутри объекта (твердый-жидкий) и его объема, перечисленные методы дают большие погрешности при изменениях ДП от 4 до 80, характерных для размораживаемых биологических тканей в области температур от -20 до -1 °С.

Наиболее прост и относительно недорог в технической реализации в диапазоне ОВЧ резонансный метод, однако стандартные типы резонаторных ячеек имеют большие габариты и требуют объемных (и дорогих) холодильных камер при проведении исследований.

Поэтому основной целью работы была разработка компактной резонаторной измерительной ячейки (ИЯ) диапазона ОВЧ для работы с неоднородными многофазными замороженными биологическими тканями в холодильных камерах относительно небольшого объема при температурах от -20 до -1 °С, в которой измеряемые образцы имеют значимые размеры, и излучение наружу отсутствует, а также адекватного для этого случая, метода определения диэлектрических характеристик замороженных биотканей.

1. Объекты исследований

Объектами исследований являлись образцы водного льда из дистиллированной воды и замороженных биотканей.

2. Измерительная ячейка

Геометрия резонаторной (ИЯ), ее резонансные частоты и соответствующие им распределения ВЧ полей рассчитаны с помощью программы трехмерного моделирования электродинамических систем MEMFIS [14], основанной на методе конечных элементов, которая апробирована при проектировании сверхвысокочастотных фильтров и резонаторных систем. На основе расчетных данных спроектирована и разработана конструкция ИЯ (рис. 1).

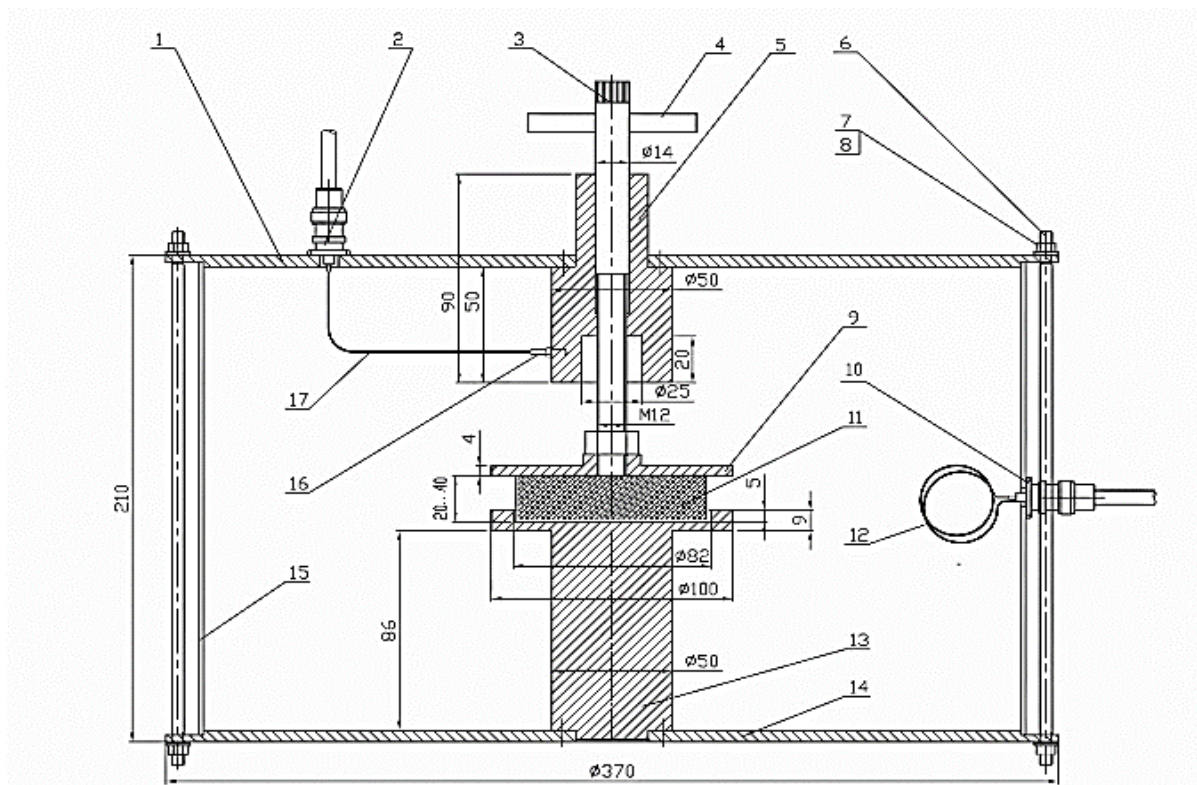


Рис. 1. Конструкция ИЯ: 1 – фланец верхний, 2 – разъем ВЧ ввода, 3 – шток перемещения верхнего электрода, 4 – ручка штока, 5 – направляющая штока, 6 – шпилька, 7 – гайка М6, 8 – шайба пружинная, 9 – электрод верхний, 10 – разъем ВЧ выхода, 11 – измеряемый образец в диэлектрической технологической оснастке, 12 – петля связи выходного сигнала, 13 – опора нижнего электрода, 14 – фланец нижний, 15 – боковая стенка, 16 – контакт верхнего электрода, 17 – антенна входного сигнала.

Боковая стенка ИЯ (поз.15) изготовлена из алюминиевой цилиндрической трубы с толщиной стенки 3 мм, а верхний (поз.1) и нижний (поз.14) фланцы – из стали толщиной 5 мм. Крепление фланцев к обечайке осуществлено с помощью трех стяжных шпилек (поз.6) с применением пружинных шайб, нивелирующих механические деформации в процессе температурных колебаний ячейки. Внутри расположены верхний подвижный (поз.9) и нижний с механической опорой (поз.13) электроды конденсатора, изготовленные из алюминиевого сплава АМгб с полировкой внутренних поверхностей. Нижний электрод выполнен неподвижным, а верхний перемещается с помощью винтового штока (поз.3). Нижняя цилиндрическая опора конденсатора и держатель штока изготовлены из нержавеющей стали.

Диаметр медного провода антенны входного сигнала 2 мм, а провода петли связи выходного сигнала – 3 мм. Двухвитковая петля связи имеет внутренний диаметр 50 ± 2 мм.

3. Математическая модель расчета ДП твердых диэлектриков по измеренным резонансным частотам ИЯ

ИЯ на основном (низшем) виде колебаний может быть представлена параллельным RLC колебательным контуром (рис. 2).

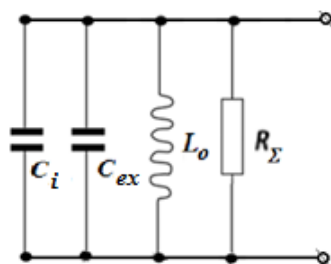


Рис. 2. Эквивалентная схема ИЯ на низшем виде колебаний.

На схеме (рис. 2) приняты следующие обозначения: L_0 – собственная индуктивность резонатора, C_i – емкостная часть конденсатора ИЯ, в которой размещается измеряемый диэлектрик, C_{ex} – оставшая (краевая) емкость ИЯ, R_Σ – сопротивление потерь в резонаторе, $R_\Sigma = \frac{R_0 R_n}{R_0 + R_n}$, R_0 – сопротивление собственных омических потерь ИЯ, R_n – эквивалентное сопротивление нагрузки, вносимое петлями связи в ИЯ.

Суммарная емкость конденсатора ИЯ с размещенным в ней диэлектриком: $C = \varepsilon C_i + C_{ex}$, здесь ε – относительная ДП диэлектрика.

Комплексная проводимость Y параллельного колебательного контура:

$$Y = \frac{1}{j\omega L_0} + j\omega(\varepsilon C_i + C_{ex}) + \frac{1}{R_\Sigma}, \quad (1)$$

где j – мнимая единица, ω – круговая частота, $\omega = 2\pi f$, f – частота.

В режиме резонанса на частоте $\omega = \omega_p$ реактивная часть комплексной проводимости (1) равна нулю:

$$\operatorname{Im} Y = -\frac{1}{\omega_p L_0} + \omega_p (\varepsilon C_i + C_{ex}) = 0$$

или

$$\omega_p^2 (\varepsilon L_0 C_i + L_0 C_{ex}) = 1. \quad (2)$$

Обозначим в (2) через $x_1 = L_0 C_i$, а через $x_2 = L_0 C_{ex}$, и пусть имеются данные измерения резонансных частот образцов двух известных (эталонных) диэлектриков, т.е. ω_1 для диэлектрика с ε_1 и ω_2 для диэлектрика с ε_2 . Для этих диэлектриков запишем систему двух уравнений относительно x_1 и x_2 :

$$\begin{aligned} \omega_1^2 (\varepsilon_1 x_1 + x_2) &= 1 \\ \omega_2^2 (\varepsilon_2 x_1 + x_2) &= 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение системы (3) имеет вид:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_1^2 \omega_2^2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}, \\ x_2 &= \frac{\varepsilon_2 \omega_2^2 - \varepsilon_1 \omega_1^2}{\omega_1^2 \omega_2^2 (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Пусть имеется диэлектрик, идентичный по размерам эталонным образцам с неизвестной ДП ε_x , который помещен в измерительную ячейку, и для него найдена резонансная частота ω_x . Из формулы (2) следует, что

$$\varepsilon_x = \frac{1 - \omega_x^2 x_2}{\omega_x^2 x_1}. \quad (5)$$

После подстановки в (5) выражений для x_1 и x_2 из (4) и несложных преобразований получим следующую формулу для расчета ДП измеряемого образца:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{\omega_2^2 (\omega_1^2 - \omega_x^2)}{\omega_x^2 (\omega_1^2 - \omega_2^2)}. \quad (6)$$

В качестве базовых диэлектриков целесообразно взять сухой воздух и фторопласт, ДП которых $\varepsilon_1 = 1,0$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_f$ ($\varepsilon_f = 1,9-2,1$ [15]) постоянны в диапазоне частот 100–200 МГц в интервале температур $[-20, -1]$ °С. В этом случае формула (6) примет вид:

$$\varepsilon_x = 1 + (\varepsilon_t - 1) \frac{\omega_2^2(\omega_1^2 - \omega_x^2)}{\omega_x^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}. \quad (7)$$

Так как $\omega = 2\pi f$, то вид формул (6) и (7) не изменится, при замене в них круговых частот на обычные.

В формуле (1) формально введена емкость C_{ex} , создаваемая краевыми электрическими полями. В данном случае под краевыми электрическими полями понимаются все электрические поля, находящиеся вне диэлектрика, в том числе поля внутри самого конденсатора ИЯ, так как диэлектрик заполняет его частично, а также все электрические поля, находящиеся вне конденсаторной части ИЯ.

4. Математическая модель расчета ДП аморфных и жидких диэлектриков в диэлектрической технологической оснастке по измеренным резонансным частотам ИЯ

Образцы биологических тканей при низких отрицательных температурах имеют твердую структуру и сохраняют заданную геометрическую форму, как и эталонные твердые диэлектрики, однако при отеплении лед в них частично переходит в воду, и образцы становятся пластичными (аморфными). Для сохранения заданных геометрических размеров образцов во всем диапазоне заданных температур: $[-20, -1]^\circ\text{C}$ использована диэлектрическая технологическая оснастка (ТО).

В случае жидких диэлектриков ТО представляет собой тонкостенный цилиндрический диэлектрический стакан с толщиной дна $d_{ст}$ и стенок по 1,5 мм, высотой 20 мм и ДП $\varepsilon_{ст} = 2,3$. В случае пластичных диэлектриков – диэлектрический полый цилиндр с толщиной стенки 1,5 мм, высотой 19,6 мм, закрытый сверху и снизу диэлектрическими пленками, толщиной по 0,2 мм. ДП цилиндра 2,3, а – пленок 2,0, соответственно. ТО была изготовлена в трех вариантах с внешним диаметром: 50, 69 и 82 мм.

При размещении ТО в виде тонкостенного цилиндрического диэлектрического стакана в емкостной зазор ИЯ, суммарная емкость

конденсатора со стаканом (последовательное включение конденсаторов) запишется как:

$$C_{\Sigma} = \frac{\varepsilon_{ст} r_c C_i C_{ст}}{\varepsilon_{ст} r_c C_i + C_{ст}}, \quad (8)$$

где $C_{ст}$ – емкость, вносимая самим стаканом, r_c – коэффициент заполнения конденсатора диэлектриком, характеризующий увеличение емкости «пустой» ячейки C_i за счет высоты, занимаемой дном диэлектрического стакана. При расстоянии между пластинами конденсатора $D = 20$ мм и толщине дна стакана $d_{ст} = 1,5$ мм $r_c = D/(D - d_{ст}) = 1,08$.

Если диэлектрик плотно закрыт сверху диэлектрической пленкой толщиной $\Delta = 0,2$ мм, то $r_c = D/(D - d_{ст} - \Delta)$, а в случае аморфных диэлектриков дно ТО также является диэлектрической пленкой, тогда $r_c = D/(D - 2\Delta)$. При бесконечно малой толщине пленок $r_c = 1$.

Если ТО плотно заполнена материалом с ДП $\varepsilon_{ст} = \varepsilon_2$, то уравнение (1) примет вид:

$$\omega_2^2 (\varepsilon_2 L_0 r_c C_i \frac{L_0 C_{ст}}{\varepsilon_2 L_0 r_c C_i + L_0 C_{ст}} + L_0 C_{ex}) = 1. \quad (9)$$

Отметим, что резонансная частота ячейки ω_p в этом случае равна резонансной частоте ячейки ω_2 , занятой монолитным образцом с ε_2 , т.е. $\omega_p = \omega_2$.

Введем в (9) по аналогии с (1) следующие обозначения: $x_1 = L_0 C_i$, $x_2 = L_0 C_{ex}$, $x_3 = L_0 C_{ст}$.

В принятых обозначениях (9) запишется как:

$$\omega_2^2 (\varepsilon_2 r_c x_1 \frac{x_3}{\varepsilon_2 r_c x_1 + x_3} + x_2) = 1. \quad (10)$$

При этих условиях уравнение (10) аналогично второму уравнению в (3).

Откуда следует, что

$$r_c x_1 \frac{x_3}{\varepsilon_2 r_c x_1 + x_3} \equiv x_1, \quad (11)$$

тогда

$$x_3 = \varepsilon_2 x_1 \frac{r_c}{r_c - 1}. \quad (12)$$

Пусть измерены резонансные частоты ячейки для двух известных диэлектриков без ТО: ω_1 диэлектрика с ε_1 и ω_2 диэлектрика с ε_2 , а также частота ω_x неизвестного диэлектрика с ε_x в ТО с ДП ε_2 .

Подставляя эти частоты в (9) и (11), получим систему трех уравнений:

$$\begin{aligned} \omega_1^2(\varepsilon_1 x_1 + x_2) &= 1 \\ \omega_2^2(\varepsilon_2 x_1 + x_2) &= 1 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\omega_x^2 \varepsilon_x r_c x_1 \frac{x_3}{\varepsilon_x r_c x_1 + x_3} + \omega_x^2 x_2 = 1.$$

Решение системы первых двух уравнений в (13) аналогично решению системы уравнений (3). Подставляя значения x_1 и x_2 из (4) в третье уравнение (13), с учетом (12), после несложных преобразований получим для ε_x :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\frac{r_c}{\varepsilon_r} - \frac{r_c - 1}{\varepsilon_2}}, \quad (14)$$

где введенный параметр ε_r определяется соотношением:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{\omega_2^2(\omega_1^2 - \omega_x^2)}{\omega_x^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}. \quad (15)$$

Так как $\varepsilon_x > 0$, то знаменатель в (15) – положительное число, т.е. параметр ε_r должен удовлетворять следующему неравенству:

$$\varepsilon_r < \varepsilon_2 / \left(1 - \frac{1}{r_c}\right). \quad (16)$$

При $\varepsilon_2 = 2,1$ и $r_c = 1,08$ $\varepsilon_r < 28,35$, а для $r_c = 1,02$ $\varepsilon_r < 107,2$. Если диэлектрик полностью заполняет конденсаторную часть ИЯ по высоте, то $r_c = 1$ и

$$\varepsilon_x \equiv \varepsilon_r = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{\omega_2^2(\omega_1^2 - \omega_x^2)}{\omega_x^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}, \quad (17)$$

что с точностью до обозначений совпадает с формулой (6), полученной для твердых диэлектриков.

В частности, для базовых диэлектриков: сухого воздуха и фторопласта, которые в ОБЧ диапазоне частот имеют ДП $\varepsilon_1 = 1,0$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon_t$, формулы (14–15) примут вид:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{\frac{r_c}{\varepsilon_r} - \frac{r_c - 1}{\varepsilon_t}}, \text{ где } \varepsilon_r = 1 + (\varepsilon_t - 1) \frac{f_2^2(f_1^2 - f_x^2)}{f_x^2(f_1^2 - f_2^2)}. \quad (18)$$

Точность формулы (18) проверена путем численного эксперимента с использованием трехмерной программы моделирования электродинамических систем [14]. Для нескольких образцов однородных диэлектриков в диэлектрическом стакане с внешним диаметром $\varnothing 50$ мм, высотой $H = 20$ мм и толщиной дна и стенок $d_{\text{ст}} = 1,5$ мм ($r_c = 1,08$) численно получены следующие значения резонансных частот ИЯ:

$f_1 = 220,0$ МГц для сухого воздуха (без стакана) $H = 20$ мм при $\varepsilon = 1,0$;

$f_2 = 204,0$ МГц для фторопласта (без стакана) $\varnothing 50$, $H = 20$ мм при $\varepsilon = 2,1$;

$fx_1 = 193,0$ МГц для льда в стакане при $\varepsilon = 3,15$;

$fx_2 = 114,6$ МГц для постного мяса в стакане при $\varepsilon = 60,0$;

$fx_3 = 111,4$ МГц для дистиллированной воды в стакане при $\varepsilon = 79,0$.

Беря первые два значения ДП материалов (воздух и фторопласт) и соответствующие им значения частот в качестве базовых в формуле (18), и подставляя в (18) соответствующие значения резонансных частот остальных диэлектриков fx_i , получим следующие значения их ДП: $\varepsilon_{x1} = 3,15$ для льда, $\varepsilon_{x2} = 60,15$ для постного мяса и $\varepsilon_{x3} = 78,79$ для дистиллированной воды.

Из сравнения исходных значений ДП и значений, полученных по формуле (18), следует, что погрешность вычисления ДП образцов по формуле (18) в интервале значений ДП от 3 до 80 не превышает 0,25 %.

По формуле (18) для экспериментально измеренных значений резонансных частот ИЯ с размещенной в ней ТО $\varnothing 50$ мм и $r_c = 1,02$, заполненной базовыми диэлектриками: сухим воздухом и фторопластом построена номограмма (рис. 3), позволяющая с графической точностью по измеренным резонансным частотам

образцов диэлектриков в составе ТО определять значения ДП самих диэлектрических материалов.

Измеренная собственная резонансная частота ИЯ, заполненной сухим воздухом без ТО, $f_B = 224,0 \pm 0,35$ МГц, а собственная добротность $Q_B = 85 \pm 3$.

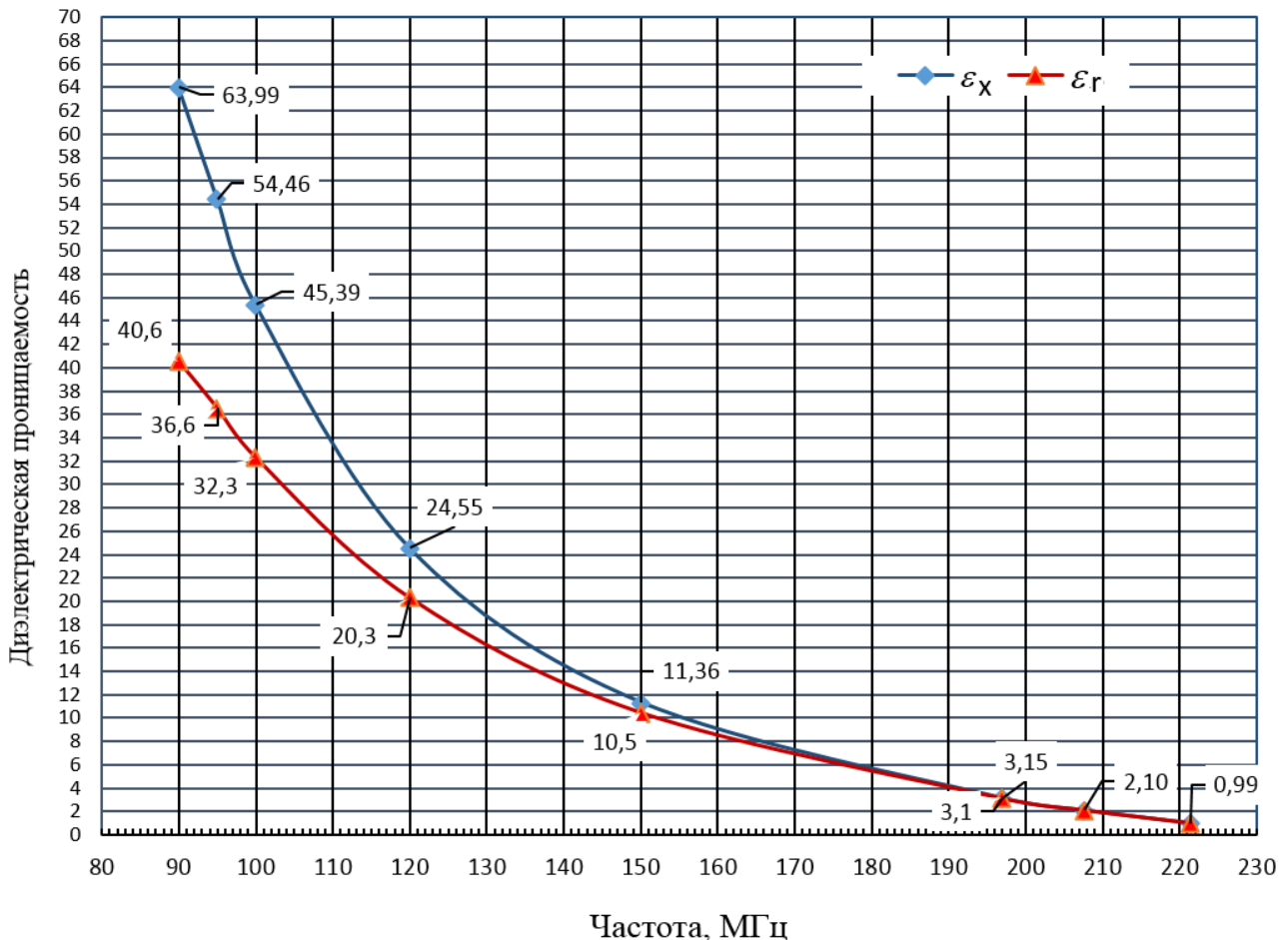


Рис. 3 Номограмма расчета ДП образцов $\epsilon_r(f)$ и $\epsilon_x(f)$ в ТО по значениям резонансных частот ИЯ при частотах базовых диэлектриков: сухого воздуха в ТО $f_B = 221,36$ МГц и фторопласта Ф-4 с $\epsilon_f = 2,1$, $f_t = 207,6$ МГц.

Из приведенных на рис. 3 графиков следует, что $\epsilon_r(f)$ характеризует «эффективную» ДП измеряемого диэлектрика в составе диэлектрической ТО. При $\epsilon_x(f) < 6$ частотные зависимости ДП образца $\epsilon_x(f)$ и «эффективной» ДП $\epsilon_r(f)$ практически не отличаются. Это значит, что при таких значениях ДП влияние диэлектрических параметров самой ТО несущественно, и измеряемые образцы вместе с ТО проявляют себя как однородные среды.

Фторопласт Ф4, в зависимости от изготовителя, имеет разброс значений относительной ДП от 1,9 до 2,1. Графики на рис. 4 иллюстрируют влияние

разброса значений ДП базового диэлектрика-фторопласта и, соответственно, частоты ИЯ с фторопластом на вычисляемую по формуле (18) ДП измеряемых диэлектриков.

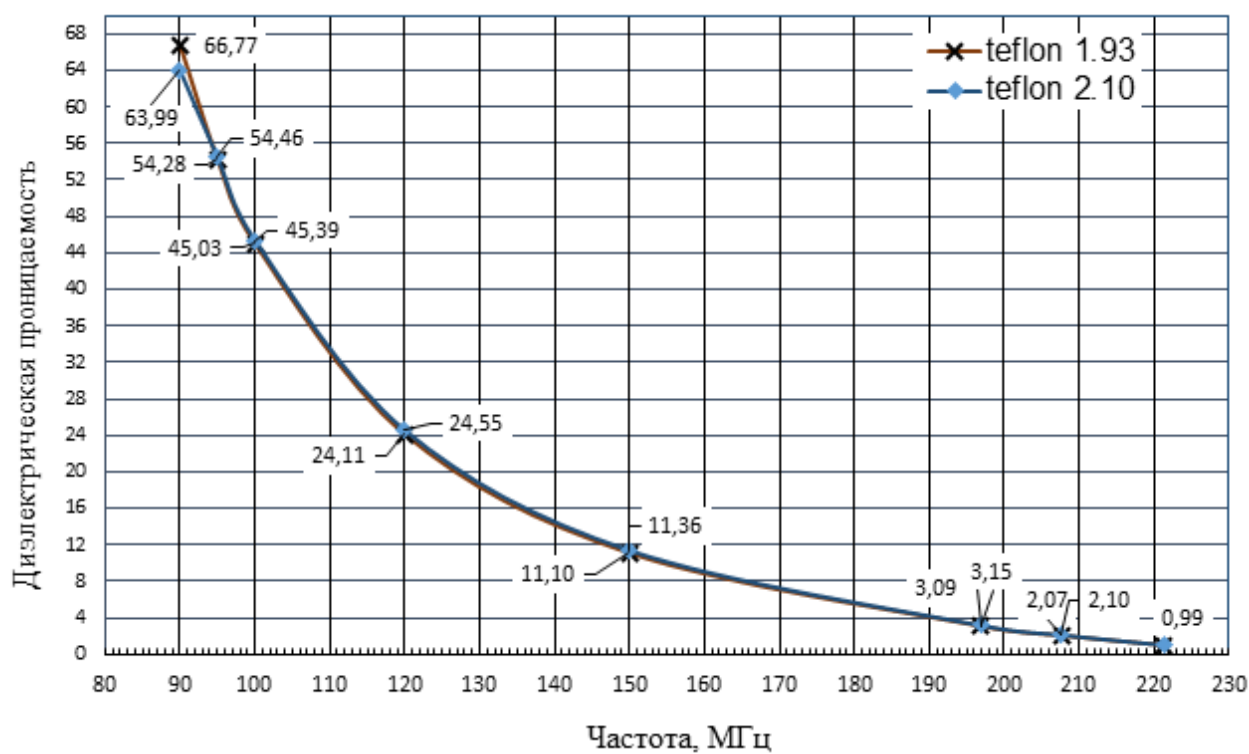


Рис. 4 Зависимости ДП образцов $\varepsilon_x(f)$ от частоты при частотах базовых диэлектриков: сухого воздуха в ТО ($f_b = 221,36$ МГц), фторопласта с $\varepsilon_t = 1,93$, ($f_t = 209,2$ МГц) (×) и фторопласта с $\varepsilon_t = 2,1$, ($f_t = 207,6$ МГц) (◆).

При отклонении ДП фторопласта от значения $\varepsilon_t = 2,1$ до значений $\varepsilon_t = 1,93$ (5 %), измеренная частота ИЯ с фторопластом увеличивается на 0,8 % до значения $f_t = 209,2$ МГц. При этом, как следует из приведенных на рис. 4 графиков, различия значений ДП лежат в пределах 1 – 2 % во всем интервале измеряемых ДП. Это свидетельствует о том, что результаты вычисления ДП по формуле (18) практически не зависят от технологического разброса ДП базового диэлектрика-фторопласта.

5. Фактор диэлектрических потерь

Поляризационные потери в диэлектрике учитываются введением комплексной ДП:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (19)$$

где ε' – ДП, а ε'' – фактор диэлектрических потерь измеряемых диэлектриков. При этом потерями в самой ТО пренебрегаем в силу малых значений диэлектрических потерь в материале оснастки и малости ее объема по сравнению с объемом образцов диэлектрика.

Запишем формулу суммарной комплексной проводимости эквивалентного колебательного контура (1) с учетом (19):

$$Y = \frac{1}{j\omega L} + j\omega(\varepsilon' C_i + C_{ex}) + \omega C_i \varepsilon'' + \frac{1}{R_\Sigma}, \quad (20)$$

Активная составляющая комплексной проводимости контура:

$$\operatorname{Re} Y = \omega C_i \varepsilon'' + \frac{1}{R_\Sigma}. \quad (21)$$

Для модели ИЯ в виде параллельного RLC колебательного контура добротность вида колебания по определению:

$$Q = \omega W/P, \quad (22)$$

где $W = \frac{1}{2}CU^2$ – средняя за период колебания запасенная энергия, $P = \frac{1}{2}U^2/R_\Sigma$ – средняя за период колебания суммарная мощность потерь, U – амплитуда переменного напряжения высокочастотного колебания в контуре.

Обратная величина добротности контура (22) с учетом (21) примет вид:

$$\frac{1}{Q} = \frac{P_\Sigma}{\omega W} = \frac{\frac{1}{2}U^2 \operatorname{Re} Y}{\frac{1}{2}U^2 \omega(\varepsilon' C_i + C_{ex})} = \frac{\omega \varepsilon'' + \frac{1}{C_i R_\Sigma}}{\omega(\varepsilon' + \xi)}, \quad (23)$$

где $\xi = \frac{C_{ex}}{C_i}$ – параметр краевого поля.

Из определения переменных в (10) $x_1 = L_0 C_i$ и $x_2 = L_0 C_{ex}$ следует, что

$$\xi = \frac{x_2}{x_1}. \quad (24)$$

Подставляя в (24) значения x_1 и x_2 из (4), получим

$$\xi = \frac{\varepsilon_2 \omega_2^2 - \varepsilon_1 \omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}. \quad (25)$$

Для обычных частот и базовых диэлектриков: сухого воздуха и фторопласта формула (25) примет вид:

$$\xi = \frac{\varepsilon_i f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (26)$$

Из (23) следует, что

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon' + \xi)}{Q} - \frac{1}{\omega C_i R_\Sigma}. \quad (27)$$

Для сухого воздуха в ИЯ $\varepsilon'' = 0$, тогда из (27)

$$\frac{1}{C_i R_\Sigma} = \frac{\omega_b (1 + \xi)}{Q_b}, \quad (28)$$

здесь индекс «в» обозначает величины, относящиеся к измеренным значениям частоты и добротности ИЯ, заполненной сухим воздухом.

С учетом (28) формула (27) примет вид:

$$\varepsilon_x'' = \frac{(\varepsilon_x' + \xi)}{Q_x} - \frac{f_b (1 + \xi)}{f_x Q_b}, \quad (29)$$

здесь индекс «x» обозначает величины, относящиеся к значениям частоты и добротности ИЯ с измеряемым образцом, и к комплексной ДП измеряемого образца диэлектрика.

По определению тангенс угла диэлектрических потерь диэлектрика:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{\varepsilon_x''}{\varepsilon_x'}, \quad (30)$$

где значения ε_x' вычисляются по формуле (18), а ε_x'' – по формуле (29).

6. Апробация метода определения ДП

Проверку метода измерения и методики расчета относительной действительной части ДП ε' замороженных объектов проводили на веществе с известным ДП – водном льде, приготовленном из дистиллированной воды. В широком диапазоне частот и отрицательных температур ДП льда составляет $\varepsilon_{л} = 3 \dots 3,17$ [16].

Измерение резонансных частот ИЯ f_p с исследуемыми образцами льда, а также с образцами эталонных веществ проводили с помощью анализатора спектра RIGOL DSA-815TG. Для повышения точности измерения на задающий вход анализатора спектра подавали эталонную частоту от внешнего источника гармонического сигнала, в качестве которого использовался аттестованный частотомер ЧЗ-63, внесенный в Государственный реестр средств измерений под № 82648-21 и имеющий относительную погрешность опорной эталонной частоты $\pm 10^{-6}$. Данная стабильность опорной частоты обеспечивала относительную погрешность измерения резонансной частоты ИЯ анализатором спектра не более $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ или абсолютную погрешность не более $\pm 0,005$ МГц.

Для измерения резонансных частот ИЯ с образцами льда использовали ТО для работы с аморфными диэлектриками. Измеряемые и эталонные образцы цилиндрической формы имели идентичные геометрические размеры: внешние диаметры 50, 69 и 82 мм и высоту $H = 20$ мм.

Рассчитанные по формуле (18) значения ДП льда для образцов различных диаметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения ДП образцов льда различных диаметров

Диаметр образца, мм	f_p , МГц	ε'
50	199,61	3,14
69	184,22	3,19
82	171,25	3,22

Полученные значения ДП льда хорошо соответствуют справочным данным. Абсолютная величина отклонения значений ДП льда не превышает $\pm 0,05$, что подтверждает адекватность разработанного метода и методики обработки экспериментальных данных.

7. Измерения диэлектрических параметров спинки замороженной морской форели

На рис. 5 приведены результаты измерения диэлектрических параметров образцов диаметром 50 мм и высотой 19,6 мм, изготовленных из спинки морской форели (содержание влаги 60 %, жира 24 %). Измерения проводили в процессе размораживания образцов от температуры -15 до -1 °С. В процессе повышения температуры образца от -15 до -1 °С резонансная частота ИЯ уменьшалась от 185 до 126 МГц.

Для проведения измерений на фиксированной резонансной частоте при повышении температуры образца необходимо было бы либо согласованно уменьшать диаметр образца, либо увеличивать собственную резонансную частоту ИЯ. Так как значение ДП образцов слабо зависит от частоты в диапазоне частот 100–200 МГц, то значительное усложнение эксперимента и конструкции ИЯ для корректировки резонансной частоты ИЯ было нецелесообразно.

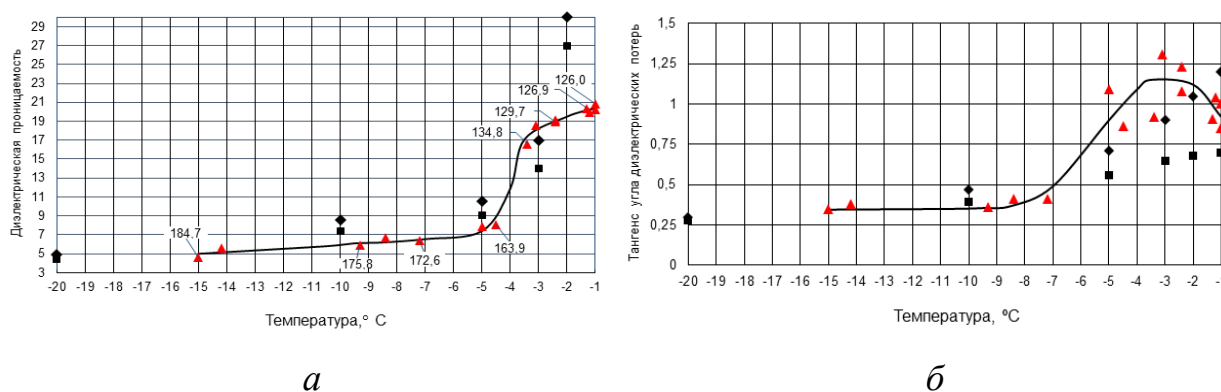


Рис. 5 Зависимости от температуры ДП (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) морской форели в диапазоне частот 155 ± 29 МГц (▲) и атлантической трески [4] на частотах 100 МГц (◆) и 200 МГц (■). Цифрами на графике (а) обозначены резонансные частоты в МГц.

Как следует из приведенных графиков ДП существенно возрастает с увеличением в образце доли размороженной воды, достигая максимального значения при криоскопической температуре (-1 °С), при этом значение ДП превышает в 4 раза значение ДП при -15 °С. Полученные диэлектрические характеристики замороженной морской форели хорошо коррелируют в области температур ниже -5 °С с данными [4] по замороженной атлантической треске

(содержание влаги 81 %, жира 3 %), но вблизи криоскопической температуры имеет место заметное различие вследствие существенной разницы в содержании воды и жира в тканях морской форели и атлантической трески.

Заключение

1) Разработан новый метод расчета ДП и тангенса угла диэлектрических потерь замороженных биотканей в условиях фазовых переходах по измеренным резонансным частотам. В отличие от метода малых возмущений в предлагаемом методе относительные сдвиги частот (возмущения) могут быть значительны (до 100 %), и, кроме того, отсутствуют жесткие ограничения на объем, форму и состав образца, а также необходимость калибровки ИЯ. Относительная погрешность метода при определении ДП в интервале значений от 3 до 80 менее 1 %.

2) Выполнено трехмерное математическое моделирование, разработана и изготовлена резонаторно-конденсаторная ИЯ, предназначенная для работы в холодильной камере, и на ее основе создан лабораторный стенд для измерения резонансным методом ДП замороженных биотканей в диапазоне частот электромагнитных волн 100–200 МГц в широком интервале температур.

3) Метод определения ДП апробирован на примере водного льда. Полученная абсолютная величина отклонения значений ДП льда от справочных значений не превышает $\pm 0,05$.

4) Результаты измерений диэлектрических параметров замороженной морской форели показывают, что вблизи криоскопической температуры (выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) доля незамороженной воды и жирность тканей образцов, определяют ход температурных зависимостей диэлектрических параметров.

Благодарности

Авторы выражают глубокую благодарность Петрову В.В. и Полякову И.А. за большую работу по конструированию и изготовлению ИЯ.

Литература

1. Chaofan Guo, Arun S. Mujumdar, Min Zhang. New Development in Radio Frequency Heating for Fresh Food Processing: a Review // Food Engineering Reviews. – 2019. – 07 January. <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9184-z>
2. Коннов А.В., Белозеров Г.А., Дибирасулаев М.А., Киреев Л.Б. Ультракоротковолновое отепление замороженных рыбных и мясных продуктов // Все о мясе. – 2022. – №5. – С. 21–25. <https://doi.org/10.21323/2071-2499-2022-5-27-31>
3. Ohlsson T., Htnriques M., Bengtsson N.E. Dielectric properties of model meat emulsions on frequencies 900 and 2800 MHz in relation to their composition // Journal of Food Science – 1974. – V.39. – P. 1153–1156. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1974.tb07341.x>
4. Bengtsson N.E., Melin J., Remi K. and Derlind S.Sc. Measurements of the dielectric properties of frozen and defrosted meat and fish in the frequency range 10–200 MHz // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 1963. – № 14. – P. 592–604. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740140812>
5. Wang S., Tang J., Rasco B., Kong F., Wang S. Dielectric properties of salmon fillets as a function of temperature and composition // Journal of Food Engineering. – 2008. – V. 87. – P. 236–246.
6. Tran V.N. and Stuchly S.S. Dielectric Properties of Beef, Beef Liver, Chicken and Salmon at Frequencies from 100 to 2500 MHz // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. – 1987. – V. 22:1. – P. 29–33. <https://doi.org/10.1080/08327823.1987.11688003>
7. Venkatesh M.S. and Raghavan G.S.V. An overview of dielectric properties measuring techniques // Canadian Biosystems Engineering. – 2005. – V. 47. – P. 7.15–7.30.
8. Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D. & Friedman S.P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry // Vadose Zone Journal. – 2003. – V. 2. – P. 444–475.

9. Chen L.F., Ong C.K., Neo C.P., Varadan V.V., Varadan Vijay K. Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization. – New York: Wile, 2004. P. 549.
10. Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials // [Электронный ресурс]. <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf>
11. Малышкина И.А. Основы метода диэлектрической спектроскопии. – М.: Физический факультет МГУ, 2012, С. 80.
12. Risman P.O. and Bengtsson N.E. Dielectric properties of food at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. 1. Measuring technique // J. Microwave Power. – 1971. – V. 6(2). – P. 103. <https://doi.org/10.1080/00222739.1971.11688788>
13. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. – М.: УРСС, 2020, С. 400.
14. Grigoriev A.D., Salimov R.V., Tikhonov R.I. Modeling of Complicated Microwave Devices by RFS Code // Int. Conf. APEDE 2012, Sept.19–20, Saratov, 2012. – P. 175–182.
15. ГОСТ 10007–80. Фторопласт-4. Технические условия. – Введ. 1981–07–01. – М.: Стандартиформ, 2008.
16. Зацепина Г.Н. Физические свойства и структура воды. – М.: Издательство Московского университета, 1974, С. 168.

Для цитирования:

Коннов А.В., Белозеров Г.А., Сотсков В.А. Определение диэлектрических характеристик замороженных биологических тканей в условиях протекающих в них фазовых переходов // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – № 3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.3.12>