

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ РЫБНЫХ ПРОДУКТОВ

Канд. техн. наук В. Н. ПОДСЕВАЛОВ и Ф. В. МАЛИЙ

Астраханское отделение ВНИРО

Применение токов высокой частоты при обработке различных материалов находит все более широкое распространение и представляет интерес для рыбной промышленности. Некоторые работы по изучению воздействия токов высокой частоты на рыбные продукты были проведены впервые в 30-х годах Центральной лабораторией электромагнитных волн, входящей в настоящее время в состав Всесоюзного научно-исследовательского института консервной промышленности (ВНИИКП). В 1950 г. на Киевском рыбокомбинате инженерами М. И. Калитиной, А. А. Калитиным и Л. Л. Барвинским токи высокой частоты были применены для проварки рыбы в процессе горячего электрокопчения. С 1951 г. начались работы по изысканию новых методов обработки рыбы с применением токов высокой частоты в Астраханском отделении ВНИРО.

Под воздействием токов высокой частоты на продукты и материалы понимается главным образом термическое действие.

Высокочастотный нагрев существенно отличается от других способов нагрева, при которых тепло постепенно проникает с поверхности внутрь тела и источник тепла всегда имеет температуру значительно выше температуры нагреваемого тела. При высокочастотном нагреве диэлектриков и полупроводников тепло генерируется в самом нагреваемом объекте по всему его объему одновременно и равномерно. Скорость нагрева токами высокой частоты в десятки и сотни раз превышает скорость нагрева другими способами. Процесс тепловой обработки продуктов в поле высокой частоты продолжается несколько минут, а иногда и секунд и происходит по законам иным, чем для обычного прогрева. Отличие заключается в избирательном действии токов высокой частоты на нагреваемый продукт, проявляющемся в том, что отдельные части, входящие в состав продукта, нагреваются сильнее остальных составляющих.

Если при обычном нагреве какого-либо продукта приходится считаться с его геометрическими размерами и такими физическими параметрами, как теплопроводность, плотность, вязкость и теплоемкость, то при нагреве токами высокой частоты решающее значение имеют: 1) характер электромагнитного поля, его конфигурация, напряженность, частота тока, т. е. показатели, определяемые применяемым оборудованием и режимом его работы и 2) электрические свойства нагреваемого продукта, зависящие от свойств веществ, входящих в его состав,

Высокочастотный нагрев может быть осуществлен правильно только в том случае, когда используемое оборудование и режим его работы находятся в определенном соответствии с электрическими параметрами нагреваемого продукта.

Поэтому разработку вопросов применения токов высокой частоты для нагревания тех или иных продуктов следует начинать с изучения их электрических свойств.

Различные материалы по своим электрическим свойствам разделяются на следующие три группы: 1) проводники, 2) диэлектрики, 3) полупроводники.

Основным электрическим параметром проводника является величина его удельной электропроводности $\gamma \frac{1}{\text{ом-см}}$ или обратная ей величина удельного сопротивления ρ ом-см.

Диэлектрики обычно характеризуются величинами относительной диэлектрической проницаемости ϵ , тангенсом угла потерь $\text{tg } \delta$ и электрической прочностью, которая определяется величиной пробивной напряженности электрического поля $E_{пр}$.

Полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками, и в зависимости от того, к какой группе полупроводник ближе по своим свойствам, он может быть характеризован величинами, типичными для проводника или диэлектрика.

Применение куметра для исследования электрических свойств пищевых продуктов

Электрические свойства материалов можно измерить различными методами. На радиочастотах наибольшее распространение имеет резонансный метод. При осуществлении высокочастотного нагрева необходимо знать электрические свойства материалов в широком диапазоне частот, для определения которых наиболее подходящим прибором является куметр типа КВ-1.

Прибор КВ-1 позволяет легко и быстро определить добротность колебательной цепи, которая определяется формулой:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega CR}, \quad (1)$$

т. е. выражает отношение реактивного сопротивления колебательной цепи к ее активному сопротивлению.

Основными элементами куметра, блок-схема которого показана на рис. 1, являются: генератор высокой частоты, дающий частоты от 50 кгц

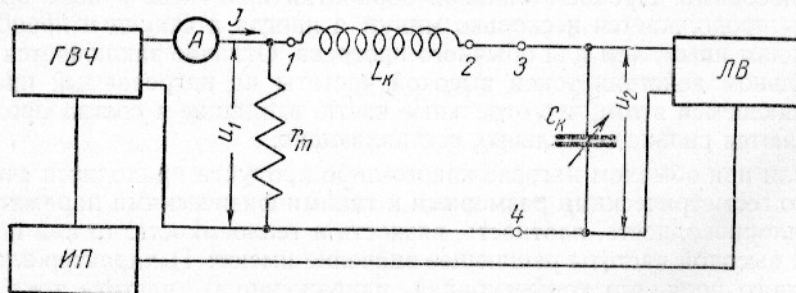


Рис. 1. Блок-схема куметра:

ГВЧ—генератор высокой частоты; ЛВ—ламповый вольтметр; ИП—источник питания; 1 и 2—катушечные зажимы измерительного контура; 3 и 4—конденсаторные зажимы измерительного контура.

до 50 мгц; измерительный контур L_k, C_k ; ламповый вольтметр; источник питания генератора и лампового вольтметра. Генератор присоединяют к измерительному контуру через эталонное безреактивное сопротивление r_m малой величины.

Как известно из радиотехники, в момент резонанса напряжение u_2 на емкости C_k или индуктивности L_k последовательного колебательного контура больше подводимого напряжения u_1 в Q раз:

$$\frac{u_2}{u_1} = Q. \quad (2)$$

Величина напряжения u_2 измеряется непосредственно ламповым вольтметром. Подводимое напряжение u_1 ввиду его малой величины измерить трудно, поэтому его определяют по термоэлектрическому амперметру A , пользуясь уравнением:

$$u_1 = I r_m. \quad (3)$$

В процессе измерения величины тока в цепи I , а, следовательно, и напряжении u_1 , поддерживаются постоянными. Это дает возможность проградуировать шкалу лампового вольтметра непосредственно в значениях добротности колебательной цепи— Q , как это и сделано в приборе КВ-1.

Для измерения электрических свойств материала из него изготавливают образец в виде конденсатора, который затем подключают к соответствующим зажимам измерительного контура куметра.

Процесс испытания образца на куметре состоит в том, что вначале определяют добротность контура (Q_1) и значение резонансной емкости измерительного контура (C_1) без испытуемого образца, а затем определяют соответствующие величины (Q_2 и C_2) с подключенным испытуемым образцом. Зная эти четыре величины, а также частоту тока (f), при которой проводились измерения, можно по соответствующим формулам вычислить значения полного сопротивления (R) и емкости (C) испытуемого образца. Далее, зная геометрические размеры образца, определяют либо диэлектрическую проницаемость и тангенс угла потерь, либо активное и реактивное удельные сопротивления (или активную и реактивную удельную проводимость) исследуемого материала.

Образец испытуемого материала для подключения к куметру готовят в виде плоскопараллельного конденсатора, который включают в измерительный контур куметра. В том случае, когда сопротивление образца мало, его включают в контур последовательно, а когда велико—параллельно.

С помощью куметра можно измерять два предела сопротивления: предел нижних величин, сравнимых с последовательным сопротивлением измерительного контура, и предел верхних величин, сравнимых с параллельным сопротивлением измерительного контура. Так, если измерительный контур на частоте $f_1=1$ мгц при емкости $C_k=100$ пф имеет добротность $Q \approx 200$, то его последовательное сопротивление R_s имеет величину около 8 ом, а параллельное $R_p \approx 320000$ ом. Применяя данный контур, можно при последовательном включении измерять сопротивления в диапазоне примерно от 2 до 30 ом, а при параллельном включении—в диапазоне от 100 до 1500 тыс. ом. С повышением частоты в 10 раз указанные пределы уменьшаются в 10 раз, т. е. на частоте $f_2=10$ мгц можно измерять сопротивления при последовательном включении в пределах от 0,2 до 3 ом, а при параллельном включении—в пределах от 10 до 150 тыс. ом. Точность измерения будет наивысшая в том случае, когда сопротивление

измеряемого образца будет одного порядка с сопротивлением измерительного контура.

Вышеизложенное показывает необходимость соблюдать определенные геометрические размеры испытуемого образца. Образец должен иметь такие размеры, чтобы его активное сопротивление было соизмеримо либо с последовательным, либо с параллельным сопротивлением измерительного контура на данной частоте.

При измерении электрических свойств материала в широком диапазоне частот сопротивление измерительного контура (последовательное или параллельное) будет меняться в широких пределах, поэтому провести

все измерения с образцом одного размера не удастся. В этом случае необходимо либо иметь набор образцов соответствующих размеров, либо в процессе измерения изменять соответствующим образом размеры образца.

Для включения в измерительный контур образцов жидких или мазеобразных продуктов (например, икры) было изготовлено специальное приспособление — приставка к куметру (рис. 2) со сменными сосудами и соответствующими им электродами.

Основанием приставки служит микалексовая пластинка 1, к которой на винтах прикреплены кронштейны 2 и 3. В вертикальных каналах кронштейнов передвигаются латунные трубки 4 и 5 с припаянными к ним дисками 6 и 7, являющимися обкладками образца, т. е. электродами. Электроды помещаются в стеклянном цилиндре 8, который заполняют исследуемым продуктом. Трубка 5 с нижним электродом проходит через отверстие в центре дна цилиндра, которое уплотняют резиновыми шайбами. Электроды закрепляют на необходимом расстоянии друг от друга при помощи зажимных винтов 9 и 10. Подключают приставку к куметру при помощи штепсельных ножек 11 и 12. Штепсельные гнезда в основании приставки 13 и 14 позволяют включать последовательно с образцом катушку куметра. Штепсельное гнездо 14 соединяется со штепсельной ножкой 11 при помощи латунной шинки 15.

Рис. 2. Приставка к куметру для исследования жидких и мазеобразных продуктов.

Исследуемый образец, помещенный в указанную приставку, приобретает форму цилиндра, с диаметром, равным диаметру дисков (т. е. внутреннему диаметру стеклянного цилиндра 8), и высотой, равной расстоянию между дисками. Изменять высоту образца в процессе измерения можно путем удаления или сближения дисков. Различное поперечное сечение образца может быть получено путем применения стеклянных цилиндров разного диаметра.

При последовательном включении образца в измерительный контур приставку вставляют штепсельными ножками 11 и 12 в катушечные зажимы куметра, а в штепсельные гнезда приставки 13 и 14 вставляют соответствующую катушку куметра. При параллельном включении образца приставку вставляют штепсельными ножками 11 и 12 в конденсаторные зажимы куметра, а катушку куметра подключают к катушечным зажимам куметра 1 и 2 (см. рис. 1) через специальный мостик (рис. 3).

Для подключения к куметру образцов твердых материалов применяют электроды из фольги, притертые на вазелине, парафине или трансформаторном масле.

Методика измерений и расчетные формулы

Образцы из материалов, являющихся хорошими диэлектриками, включают в измерительный контур куметра параллельно, а из материалов, близких по своим свойствам к проводникам,—последовательно. Путем проб или предварительных расчетов подбирают такие размеры образца, чтобы его сопротивление было сравнимым либо с последовательным сопротивлением измерительного контура (при последовательном включении), либо с параллельным сопротивлением измерительного контура (при параллельном включении). При измерении полупроводников бывают случаи, когда невозможно подобрать размеры образца, дающие необходимое сопротивление, т. е. сопротивление образца получается значительно больше последовательного сопротивления и значительно меньше параллельного сопротивления измерительного контура куметра. В таких случаях применяется параллельное включение последовательно соединенных образца и воздушного конденсатора.

Последовательное включение образца. При последовательном включении образца в измерительный контур расчетные формулы могут быть выведены следующим образом.

Схема измерительного контура без образца показана на рис. 4,а. Зная величину емкости при резонансе C_1 и добротность Q_1 (отсчитываемую по вольтметру куметра), легко определить значение R_1 :

$$R_1 = \frac{1}{2\pi f C_1 Q_1}. \quad (4)$$

Схема контура с включенным образцом показана на рис. 4,б. После замены последовательного соединения сопротивлений одним сопротивлением и последовательного соединения емкостей одной емкостью эквивалентная схема измерительного контура с включенным последовательно образцом будет иметь вид, показанный на рис. 4,в. В этой схеме:

$$R_2 = R_1 + R_s \quad (5)$$

и

$$\frac{1}{C_k} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_s}. \quad (6)$$

В момент резонанса конденсатор контура будет иметь емкость C_2 , а прибор покажет добротность Q_2 . Принимая во внимание, что ламповый вольтметр куметра измеряет напряжение на емкости конденсатора C_2 , а не на результирующей емкости C_k , аналогично формуле (4) будем иметь:

$$R_2 = \frac{1}{2\pi f C_2 Q_2}. \quad (7)$$

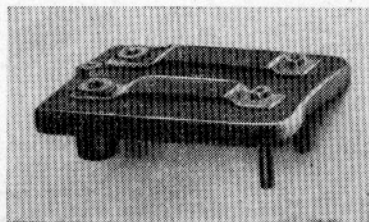


Рис. 3. Мостик для подключения катушки к куметру при параллельном включении испытуемого образца.

Подставляя это значение R_2 в формулу (5), находим R_s :

$$R_s = \frac{1}{2\pi f} \left(\frac{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}{C_1 C_2 Q_1 Q_2} \right) = K \left(\frac{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}{C_1 C_2 Q_1 Q_2} \right), \quad (8)$$

где коэффициент $K = 1,59 \cdot 10^8$, если частота выражена в килогерцах, а емкость — в пикофарадах.

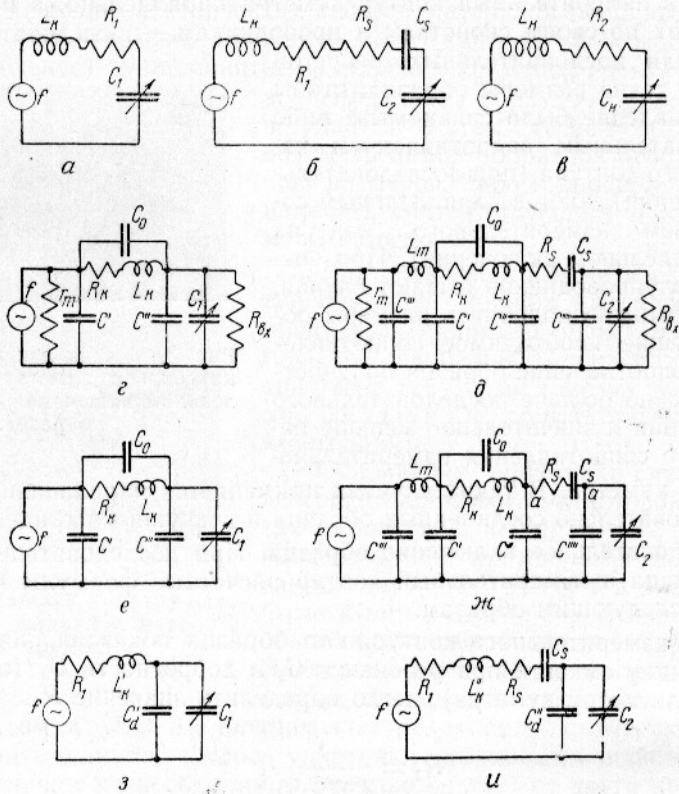


Рис. 4. Схема включения образца в измерительный контур при последовательном соединении.

Так как при измерении сопротивления без образца и с образцом частота остается неизменной, результирующая емкость C_x должна быть равной C_1 и тогда из формулы (6) получаем:

$$C_s = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}. \quad (9)$$

Следовательно, выражение для полного сопротивления образца будет иметь следующий вид:

$$Z_s = R_s + jX_s = \frac{1,59 \cdot 10^8}{f C_1 C_2} \left[\frac{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}{Q_1 Q_2} + j(C_1 - C_2) \right]. \quad (10)$$

Вышеприведенный расчет полного сопротивления образца является приближенным. Более точный результат получается, если принять во внимание емкость и индуктивность монтажа. Полная эквивалентная схема измерительного контура без образца показана на рис. 4,г, а с включенным образцом на рис. 4,д,

На данных схемах:

- r_m — сопротивление, через которое вводится в контур электро-
движущая сила;
- $R_{вх}$ — входное сопротивление вольтметра;
- C_1 — емкость контурного конденсатора;
- R_1 — активное последовательное сопротивление контура;
- L_k — самоиндукция контура;
- C_0 — распределенная (собственная) емкость катушки;
- C' и C'' — емкость монтажа;
- C_s — емкость образца;
- R_s — сопротивление образца;
- L_m — индуктивность проводников приставки;
- C''' и C'''' — емкость монтажа приставки.

Принимая во внимание, что $r_m \ll R_k$ и $R_{вх} \gg \frac{1}{\omega C_1}$, схемы рис. 4, з и 4, д можно упростить, причем они примут вид, соответственный схемам: 4, е (без образца) и 4, ж (с образцом).

Из рис. 4, е и 4, ж видно, что включение образца вносит в измерительный контур не только присущие ему R_s и C_s , но еще и дополнительные емкость и индуктивность. Измерение и учет в вычислениях этих дополнительных реактивностей является весьма кропотливым и трудоемким, и, чтобы этого избежать, применяется следующий порядок измерения.

В катушечные зажимы куметра вставляют ножки приставки, а в ее гнезда катушку куметра. Электроды приставки сближают до плотного соприкосновения, контур настраивают в резонанс и отмечают значения Q_1 и C_1 . Затем верхний электрод снимают, в цилиндр вводят исследуемый материал и плотно прижимают верхним электродом. Контур вновь настраивают в резонанс, и отмечают значения Q_2 и C_2 . При таком способе измерения эквивалентная схема измерительного контура без образца будет отличаться от схемы 4, ж только тем, что точки *аа* будут замкнуты накоротко.

Схема 4, е может быть приведена к виду простого колебательного контура, как показано на схеме 4, з, а схема 4, ж к более простой схеме 4, и. В схемах 4, з и 4, и величины L'_k и C'_d , отличны от соответствующих величин L''_k и C''_d , однако, принимая во внимание, что

$$Z_s \ll \frac{1}{\omega C'_d} \text{ и } Z_s \ll \frac{1}{\omega C''_d},$$

можно пренебречь разностью между L'_k и L''_k и между C'_d и C''_d и считать, что

$$L'_k = L''_k = L_k \text{ и } C'_d = C''_d = C_d.$$

Сложением параллельных емкостей:

$$C_1 + C_d = C_{к1} \tag{11}$$

и

$$C_2 + C_d = C_{к2} \tag{12}$$

приводим схемы 4, з и 4, и к виду схем 4, а и 4, б.

Окончательная формула, по которой определяется полное сопротивление образца, имеет вид, подобный выражению (10), с той лишь разницей, что вместо C_1 и C_2 подставляются соответственно величины $C_{к1}$ и $C_{к2}$:

$$Z_s = R_s + jX_s = \frac{1,59 \cdot 10^3}{jC_{к1}C_{к2}} \left[\frac{C_{к1}Q_1 - C_{к2}Q_2}{Q_1Q_2} + j(C_{к1} - C_{к2}) \right]. \tag{13}$$

Величина C_{κ} является той полной расчетной емкостью контура, которая дает резонанс на данной частоте с полной индуктивностью контура L_{κ} , в отличие от величины C_1 , которая является емкостью конденсатора, отсчитываемой непосредственно по его шкале.

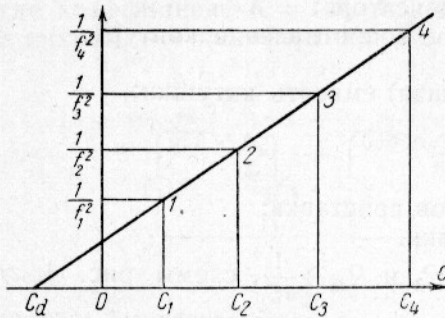


Рис. 5. Построение графика для определения емкости (C_d) при последовательном включении образца в измерительный контур.

но, пользуясь формулой Томсона, составить несколько пар уравнений с двумя неизвестными:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f_1^2} &= 4 \pi^2 L_{\kappa} (C_1 + C_d) \\ \frac{1}{f_2^2} &= 4 \pi^2 L_{\kappa} (C_2 + C_d), \end{aligned} \quad (14)$$

из которых легко определяется искомая емкость C_d .

Емкость C_d очень удобно определять графическим способом. По вертикальной оси (рис. 5) откладываются величины $\frac{1}{f^2}$, а по горизонтальной оси C . Соединяя точки пересечения 1, 2, 3 и т. д., получаем, как это следует из уравнения (14), прямую. Продолжая эту прямую до пересечения с горизонтальной осью, отсекаем на последней влево от вертикальной оси отрезок, определяющий значение C_d . Этот метод прост и вместе с тем точен.

Когда полное сопротивление образца (Z_s) измерено, т. е. определены его активная (R_s) и реактивная (X_s) составляющие, удельные сопротивления материала определяют по формулам:

активное удельное сопротивление

$$(r) = \frac{S}{h} R_s \text{ ом-см} \quad (15)$$

и реактивное удельное сопротивление

$$(x) = \frac{S}{h} X_s \text{ ом-см}, \quad (16)$$

где: S — площадь электрода в см^2 ;

h — расстояние между электродами в см.

Параллельное включение образца. При параллельном включении образца в измерительный контур расчетные формулы выводятся следующим образом. Исследуемый образец в таком случае удобнее представлять в виде параллельно соединенных активного сопротивления R_p и емкости C_p (рис. 6, а).

Величина C_d , называемая распределенной емкостью контура, учитывает паразитные емкости самого контура и приставки в пересчете их на параллельное включение.

Величину C_d можно определить методом, известным в радиотехнике для определения распределенной емкости катушек, сущность которого заключается в следующем.

При настройке контура в резонанс на разных частотах в пределах одного поддиапазона (при неизменной индуктивности) мож-

Если контур без образца имеет Q_1 и C_1 , а при включенном образце Q_2 и C_2 , то параллельное сопротивление (R_p) и параллельная емкость (C_p) образца определяются по формулам:

$$R_p = \frac{1,59 \cdot 10^8 Q_1 Q_2}{f C_1 (Q_1 - Q_2)} \quad (17)$$

$$C_p = C_1 - C_2. \quad (18)$$

Приставку к куметру с находящимся между ее электродами диэлектриком можно изобразить в виде схемы 6, б, где C_p и R_p — параллельные емкость и сопротивление образца, а C_m , C_m' и L_m — емкость и индуктивность приставки.

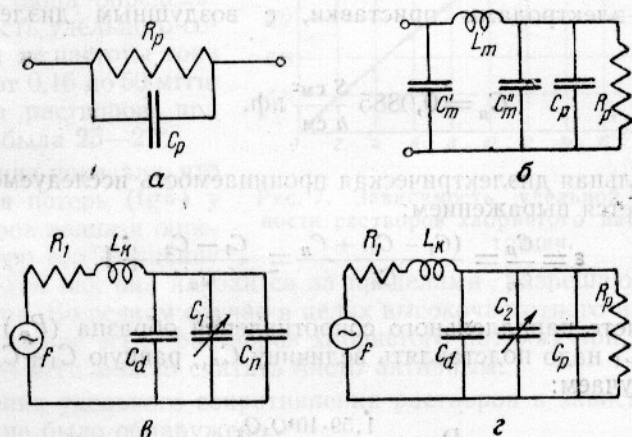


Рис. 6. Схема включения образца в измерительный контур при параллельном соединении.

Если отсчеты Q_1 и C_1 произведены при настройке контура в резонанс без приставки, а Q_2 и C_2 — с включенной приставкой, то очевидно, что значения R_p и C_p , вычисленные по формулам (17) и (18), будут неверные, поскольку в них не учитывается влияние емкости и индуктивности приставки. Чтобы избежать подобной ошибки, измерения производятся следующим образом.

К конденсаторным зажимам куметра подключают приставку с электродами, расположенными на определенном расстоянии друг от друга. Контур настраивают в резонанс и отмечают значения Q_1 и C_1 . Затем в пространство между электродами помещают исследуемый диэлектрик, контур снова настраивают в резонанс и отмечают значения Q_2 и C_2 . При этом необходимо соблюдать неизменным расстояние между электродами.

При таком способе измерения величины емкости и индуктивности приставки (C_m , C_m' и L_m) не оказывают влияния на полученные результаты R_p и C_p , но расчетные формулы, естественно, будут отличаться от формул (17) и (18).

Приведенный к простому виду измерительный контур с приставкой без образца, т. е. с воздухом между электродами, изобразится схемой 6, в, а контур с диэлектриком между электродами приставки будет иметь

вид схемы б,г. Емкость контура в первом случае будет складываться из трех составляющих: C_1 —емкости, отсчитываемой по шкале конденсатора; C_d —емкости контура (распределенной); C_n —емкости воздуха между электродами приставки. Во втором случае вместо емкости воздуха C_n находится емкость измеряемого образца C_p . Так как при отсчетах в первом и втором случаях частота и индуктивность контура остаются неизменными, то очевидно равенство:

$$C_1 + C_n = C_2 + C_p. \quad (19)$$

Отсюда искомая емкость исследуемого образца определится выражением:

$$C_p = (C_1 - C_2) + C_n. \quad (20)$$

Емкость C_n , как указано выше, представляет емкость конденсатора, образуемого электродами приставки, с воздушным диэлектриком, то есть:

$$C_n = 0,9885 \frac{S \text{ см}^2}{h \text{ см}} \text{ пф}, \quad (21)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость исследуемого образца (ε) определяется выражением:

$$\varepsilon = \frac{C_p}{C_n} = \frac{(C_1 - C_2) + C_n}{C_n} = \frac{C_1 - C_2}{C_n} + 1. \quad (22)$$

При расчете параллельного сопротивления образца (R_p) в формулу (17) вместо C_1 надо подставлять величину C_{κ_1} , равную $C_1 + C_d$, в результате чего получаем:

$$R_p = \frac{1,59 \cdot 10^9 Q_1 Q_2}{f C_{\kappa_1} (Q_1 - Q_2)}. \quad (23)$$

Тангенс угла потерь исследуемого образца вычисляется по формуле

$$\text{tg } \delta = \frac{C_{\kappa_1} (Q_1 - Q_2)}{(C_1 - C_2 + C_n) Q_1 Q_2}. \quad (24)$$

Распределенная емкость образца (C_d) определяется описанным выше графическим способом. Измерение ее производится при подключенной в контур приставке и, следовательно, отсекаемый влево от нуля отрезок горизонтальной оси будет соответствовать сумме емкостей:

$$C'_d = C_d + C_n. \quad (25)$$

Откуда искомая распределенная емкость будет равна:

$$C_d = C'_d - C_n. \quad (26)$$

Полное параллельное сопротивление образца можно вычислить по формуле:

$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{1}{Y_p} = \frac{1}{R_p} + \frac{1}{jX_p} = \frac{f C_{\kappa_1} (Q_1 - Q_2)}{K Q_1 Q_2} + j \frac{f}{K} = (C_{\kappa_2} - C_{\kappa_1}) \\ &= \frac{f}{K} \left[\frac{C_{\kappa_1} (Q_1 - Q_2)}{Q_1 Q_2} + j (C_{\kappa_2} - C_{\kappa_1}) \right]. \end{aligned} \quad (27)$$

Электрические свойства некоторых рыбных продуктов и материалов, применяемых в рыбной промышленности

Растворы хлористого натрия в воде. Поваренная соль в том или ином количестве входит в состав большинства рыбных продуктов. В зависимости от количества соли и электрических свойств ее водного раствора будет определяться характер электрических свойств самого продукта. Поэтому электрические свойства растворов хлористого натрия при высоких частотах представляют определенный интерес.

Мы исследовали растворы хлористого натрия с концентрацией: 0,5; 1; 2; 4; 6; 8; 10; 15; 20 и 25%. Для каждого раствора определяли зависимость удельного сопротивления от частоты тока в пределах от 0,16 до 50 мгц. Температура растворов при измерениях была 25—27°.

Измерения показали, что тангенс угла потерь ($\operatorname{tg} \delta$) у всех растворов велик и определить точную его величину не удалось, так как она находится за пределами разрешающей способности куметра. Во всяком случае в целях высокочастотного нагрева удельное сопротивление всех растворов хлористого натрия при частоте тока вплоть до 50 мгц можно считать чисто активным.

Изменения удельного сопротивления растворов в зависимости от частоты тока не было обнаружено.

Зависимость удельного сопротивления растворов от их концентраций [$\rho = \varphi (\% \text{ NaCl})$] (табл. 1) выражается кривой, близкой к гиперболе.

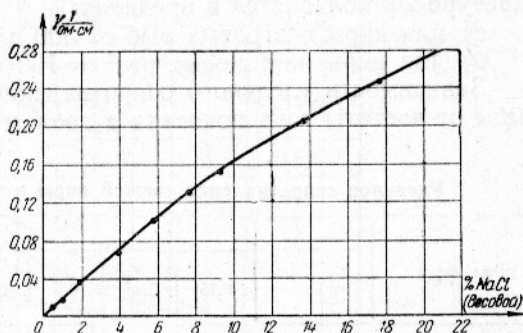


Рис. 7. Зависимость удельной электропроводности растворов хлористого натрия от концентрации.

Таблица 1

Удельное сопротивление растворов различной концентрации

Концентрация хлористого натрия в растворе (в объемных %)	0,5	1	2	4	6	8	10	15	20	25
Удельное сопротивление раствора	87	53	28	15	10	7,7	6,5	4,8	4,0	3,5

На рис. 7 показана обратная удельному сопротивлению величина удельной электропроводности ($\gamma = \frac{1}{\rho}$) растворов хлористого натрия в зависимости от их концентрации.

Икра. Икра осетровых и частичковых рыб по своим электрическим свойствам в широком диапазоне частот может быть отнесена к группе проводников. Ее свойства характеризуются величиной удельного объемного сопротивления (ρ ом·см)

Удельное сопротивление икры зависит от вида рыбы и солености икры, температуры, частоты тока и содержания примесей в икре.

Всего было проведено 790 измерений удельного сопротивления икры в зависимости от различных факторов. Исследовали икру шести видов рыбы свежую и соленую с соленостью от 1 до 8% при температуре от 20 до 100°, причем измерения проводились в диапазоне частот от 0,16 до 48 мГц с интервалами от 0,2 до 5 мГц.

Свежая икра. Удельное сопротивление свежей икры при температуре 20° колеблется в пределах:

а) для икры осетровых рыб от 300 до 670 ом-см;

б) для икры частиковых рыб от 160 до 470 ом-см.

Зависимость удельного сопротивления свежей икры разных видов рыбы от частоты тока показана в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Удельное сопротивление свежей икры в зависимости от частоты тока

Вид икры		Частота тока в мГц								
		0,16	0,25	0,5	1	3,5	10	20	30	48
Икра частиковых рыб . . .	Среднее	410	380	330	300	265	250	210	175	160
	Колебания	±60	±30	±30	±20	±15	±10	±10	±8	—
Икра осетровых рыб . . .	Среднее	560	500	450	410	380	—	—	—	—
	Колебания	±110	±110	±80	±70	±70	—	—	—	—

Таблица 3

Удельное сопротивление различных видов свежей икры

Вид икры	Состав икры в %		Удельное сопротивление в ом-см			
			частота тока от 0,16 до 3,5 мГц		частота тока от 3,5 до 48 мГц	
	влага	жир	среднее	колебания	среднее	колебания
Икра сазана	66	1,5	370	±100	220	±60
• леща	65	1,2	330	± 70	220	±60
• щуки	65	0,5	300	± 60	200	—
• севрюги	52	16,0	560	±110	—	—
• белуги	52	14,8	420	±120	—	—
• осетра	54	13,3	380	±80	—	—

Таблица 4

Удельное сопротивление свежей и размороженной икры сазана

Значения	Удельное сопротивление в ом-см	
	свежая икра	размороженная икра
Среднее	310	200
Колебания	±160	±70

Характер изменения удельного сопротивления свежей икры при ее замораживании и размораживании показан в табл. 4. В табл. 5 и на

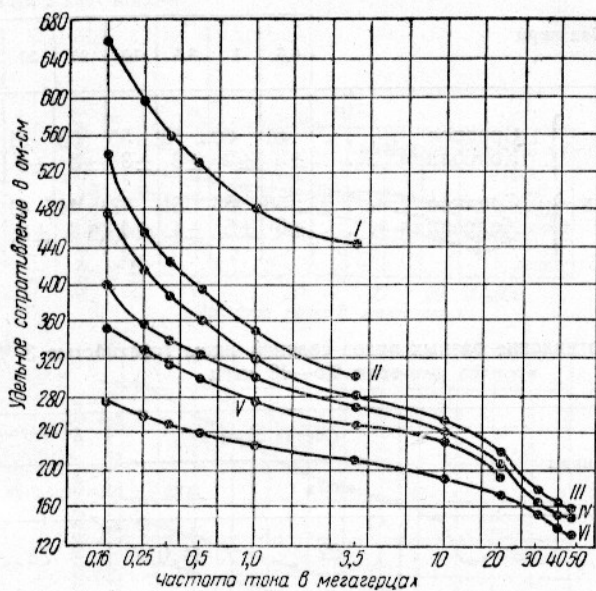


Рис. 8. Зависимость удельного сопротивления свежей икры при температуре 20° от частоты тока: I—северюга; II—белуга; III—сазан; IV—лещ; V—щука; VI—сазан после размораживания

рис. 8 и 11 показано изменение удельного сопротивления свежей икры в зависимости от ее температуры и частоты тока.

Таблица 5

Удельное сопротивление свежей икры сазана в зависимости от ее температуры (при частоте тока 10 мгц)

Температура в °С	25	30	50	70	90
Удельное сопротивление (ом-см)	260	230	165	140	170

Как видно из табл. 5 и рис. 11 при повышении температуры икры до 70—75° удельное сопротивление ее постепенно уменьшается, а при дальнейшем повышении температуры снова увеличивается (проявляется сваривание икры).

Соленая икра. Удельное сопротивление соленой икры при температуре 20° колеблется в пределах:

- а) для икры осетровых рыб от 82 до 21 ом-см;
- б) для икры частиковых рыб от 112 до 18 ом-см.

Изменение удельного сопротивления икры разных видов рыбы с соленостью 3% в зависимости от частоты тока и примеси к икре подсолнечного масла показано в табл. 6, 7 и 8.

Таблица 6
Удельное сопротивление соленой икры (соленостью 3%) в зависимости от частоты тока

Вид икры		Частота тока в мГц							Среднее для разных частот	
		0,5	1	3,5	10	20	30	40		48
Икра осетровых рыб	Среднее	61	60	58	55	53	51	53	53	56
	Колебания	±3	±3	±3	±3	±3	±4	±6	±4	±5
Икра частиковых рыб	Среднее	58	55	51	47	44	41	42	44	49
	Колебания	±6	±5	±4	±4	±3	±3	±2	±2	±8

Таблица 7
Удельное сопротивление разных видов соленой икры (соленостью 3%) при частоте тока 0,5—48 мГц

Вид икры	Состав икры в %		Удельное сопротивление в ом-см	
	влага	жир	среднее	колебания
Икра Селуги	52	14,0	58	± 5
„ севрюги	48	16,0	56	± 5
„ осетра	52	13,5	50	± 7
„ сазана	64	1,4	52	±12
„ леща	63	0,9	50	± 6
„ щуки	63	0,3	46	± 7

Таблица 8
Удельное сопротивление соленой сазаньей¹ икры (соленостью 3%) в смеси с подсолнечным маслом

Количество подсолнечного масла в % к весу икры	Частота тока в мГц					Среднее для всех частот тока	
	1	3,5	10	30	40	среднее значение	колебания
Без масла	40	38	37	36	34	37	±3
10%	49	45	44	40	39	44	±5
25%	69	65	64	55	48	59	±10

¹ Для посола была взята размороженная икра.

Удельное сопротивление различных видов соленой икры при разных частотах тока в зависимости от содержания соли в икре и способа ее обработки (передела) показано в табл. 9 и 10 и на рис. 9 и 10.

Удельное сопротивление соленой икры с содержанием соли 3% в зависимости от температуры при частоте тока 10—12 мГц показано в табл. 11 и при разных частотах на рис. 11.

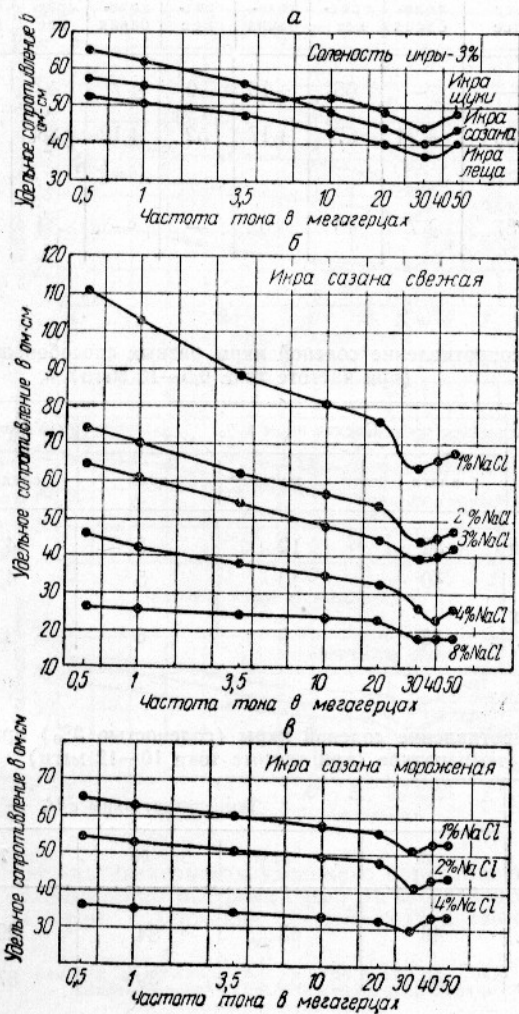


Рис. 9. Зависимость удельного сопротивления солевой частиковой икры от вида рыбы, содержания соли в икре и частоты тока:
 а—влияние вида рыбы; б—влияние содержания соли в икре (икра, посоленная в свежем виде); в—влияние содержания соли в икре (мороженая икра, посоленная после оттаивания).

Таблица 9

Удельное сопротивление соленой икры в зависимости от содержания в ней соли (при частоте тока 0,5—48 мггц)

Вид икры	Соленость икры в ‰									
	1		2		3		4		8	
	сред- нее	коле- бания	сред- нее	коле- бания	сред- нее	коле- бания	сред- нее	коле- бания	сред- нее	коле- бания
Икра осетра . .	—	—	66	±16	50	±7	42	±8	25	±3
„ сазана . .	88	±24	57	±17	52	±12	36	±9	22	±4
Икра сазана посо- лена после раз- мораживания .	57	±7	46	±6	—	—	33	±3	—	—

Таблица 10

Удельное сопротивление соленой икры разных способов обработки (при частоте тока 0,5—10 мггц)

Вид икры	Состав икры в ‰			Удельное сопротивление	
	влага	жир	соль	среднее	колебания
Зернистая осетровая	52	12	5	43	±3
Паюсная севрюжья	40	13	5	42	+3
Ястычная осетровых рыб	48	9	6	35	±4

Таблица 11

Удельное сопротивление соленой икры (соленостью 3%) при различной температуре (при частоте тока 10—12 мггц)

Вид икры	Температура икры в °С				
	25	30	50	70	90
Икра сазана	46	43	34	29	29
„ севрюги	59	55	39	37	—

Килька мороженая. Свежая рыба, в том числе и килька, обладает электрическими свойствами, близкими к свойствам икры. Так, измерение электрических свойств кильки показало, что ее удельное сопротивление может считаться чисто активным и его величина при комнатной температуре в диапазоне частот от 0,5 до 3,5 мггц находится в пределах 110—120 ом-см.

При замораживании рыбы происходит резкое изменение ее электрических свойств. В целях размораживания рыбы при помощи токов высокой частоты требуется знать электрические свойства рыбы как в замороженном, так и размороженном состоянии. Некоторое представление об электрических свойствах замороженной рыбы дают проведенные нами исследования над мороженой килькой.

Если свежая килька, так же как рыба других частичковых пород и рыбная икра близки к проводникам и измерение их электрических свойств возможно при последовательном включении образца в измерительный контур куметра, то мороженная килька является типичным полупроводником и ее удельное сопротивление имеет почти равные между собой актив-

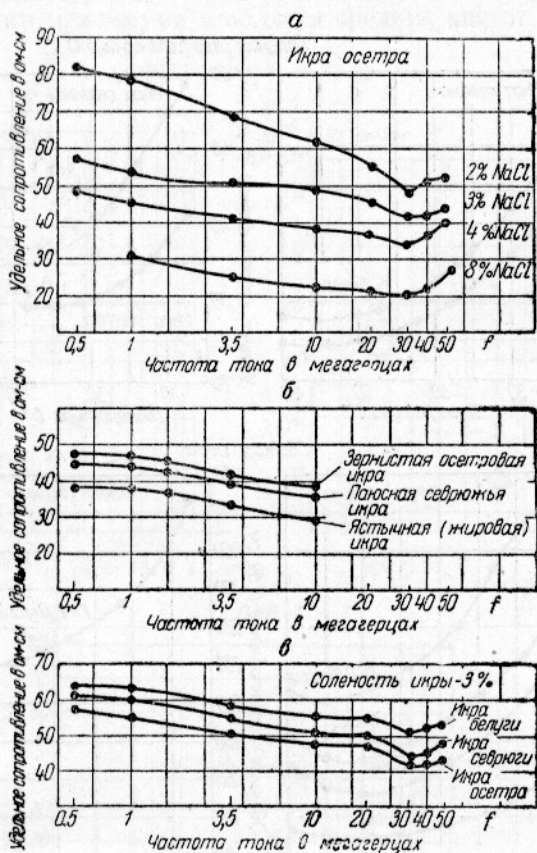


Рис. 10. Зависимость удельного сопротивления соленой икры осетровых рыб от способа посола икры, содержания в ней соли и частоты тока:

а — влияние содержания соли в икре и частоты тока; б — влияние способа обработки икры (передела); в — влияние вида икры.

ную и реактивную части. Измерение удельного сопротивления мороженой кильки невозможно при последовательном или параллельном включении образца в измерительный контур, так как величина ее сопротивления несравнима ни с последовательным, ни с параллельным сопротивлением измерительного контура куметра. В этом случае применялось параллельное включение в измерительный контур куметра последовательно соединенных исследуемого образца и воздушного конденсатора.

При определении электрических свойств мороженой кильки к конденсаторным зажимам куметра подключали воздушный конденсатор, состоящий из двух медных дисков диаметром 9 см, расположенных один от

другого на расстоянии 34 мм. Контур настраивали в резонанс и отмечали значение Q_1 и C_1 . Затем между пластинами конденсатора помещали брикет мороженой кильки, имеющий диаметр 9 см и высоту 27 мм так, что между брикетом и верхней пластиной конденсатора оставался воздушный зазор высотой 7 мм. После этого, на той же частоте тока, контур снова настраивали в резонанс и отмечали значения Q_2 и C_2 . Исходя из размеров

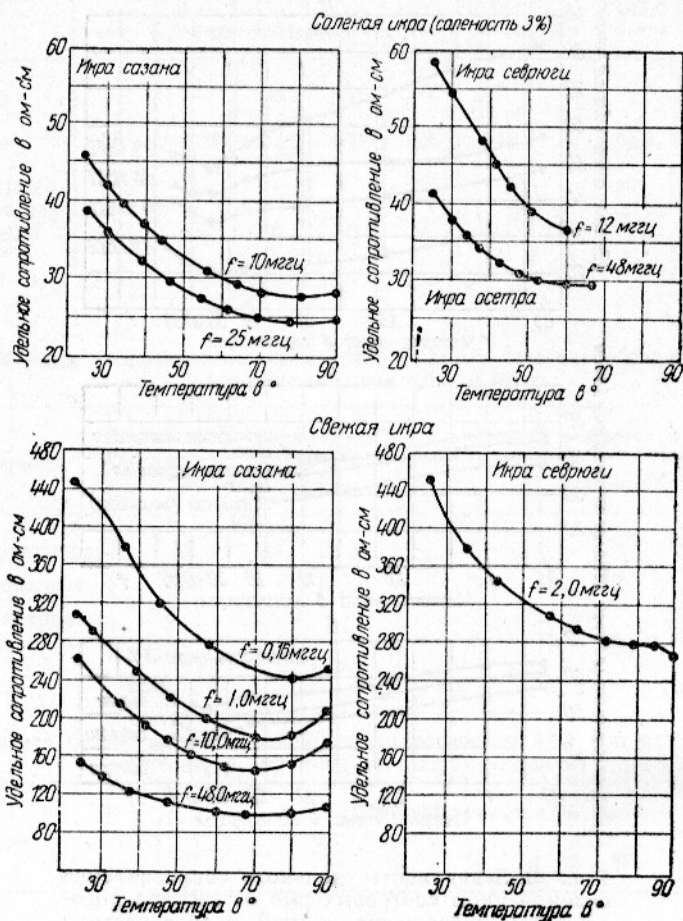


Рис. 11. Зависимость удельного сопротивления свежей и соленой икры от температуры.

брикета и воздушного конденсатора, частоты тока (f) и отсчетов Q_1 , C_1 , Q_2 и C_2 на приборах куметра производится вычисление электрических свойств мороженой кильки.

Измерение электрических свойств мороженой кильки производилось в камере холодильника спустя сутки после замораживания брикета и хранения при минус 11° . Длительная выдержка при постоянной температуре гарантирует одинаковую температуру во всех частях брикета.

Относительная диэлектрическая проницаемость (ϵ) и тангенс угла потерь (tg^2) мороженой кильки при различных частотах тока приводятся на рис. 12,а.

Кривая зависимости диэлектрической проницаемости от частоты тока

$[\varepsilon = \varphi(f)]$ имеет вид, почти совпадающий с видом кривой подобной зависимости у льда, показанной на рис. 12, в.

Кривая зависимости тангенса угла потерь от частоты тока $[\text{tg} \delta = \varphi(f)]$ у мороженой кильки (рис. 12, а) имеет вид, типичный для подобной зависимости у неоднородного полупроводника: имеется резкое возрастание тангенса угла потерь с понижением частоты тока и наличие явно выраженного максимума в области средних частот.

Мороженая килька

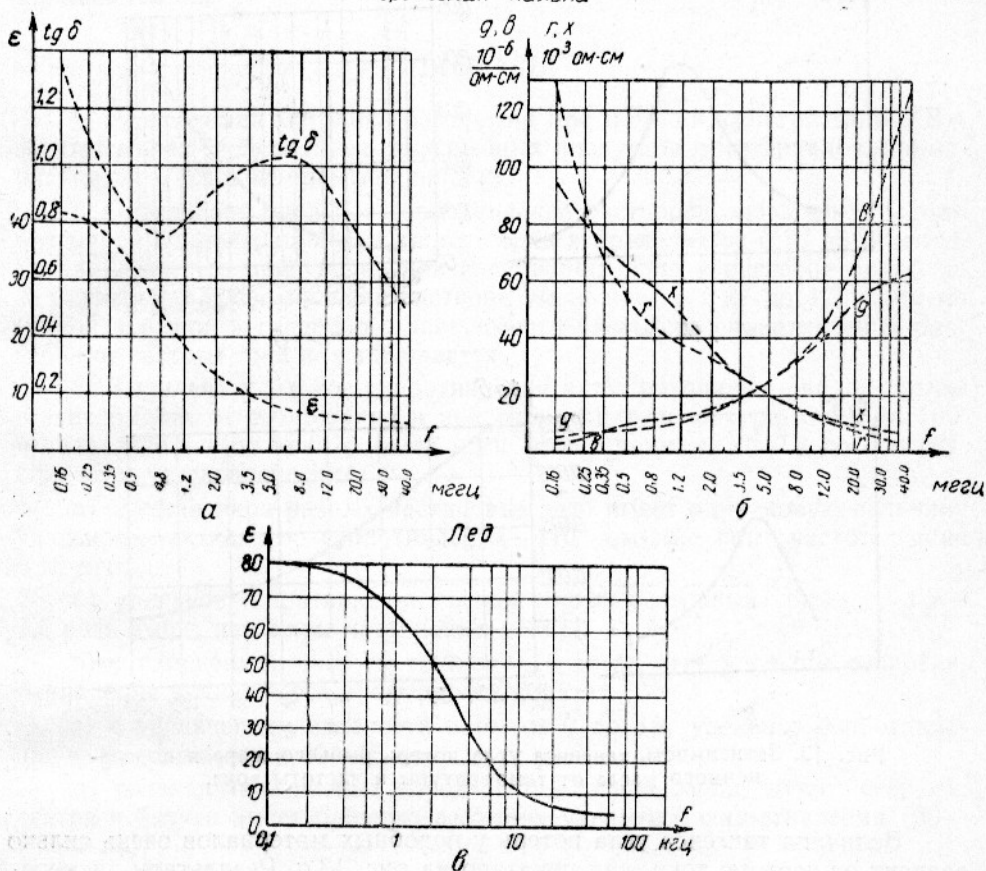


Рис. 12. Изменение электрических свойств мороженой кильки в зависимости от частоты тока.

На рис. 12, б показаны электрические свойства кильки, выраженные через активное и реактивное удельное сопротивление (x и r). Этот способ выражения электрических свойств позволяет подчеркнуть разницу между свойствами мороженой и свежей кильки. Так, если у свежей кильки активное удельное сопротивление имеет величину порядка десятков и сотен ом-см, то у мороженой кильки оно достигает величины десятков и сотен тысяч ом-см. На том же рисунке (12, б) показано также выражение электрических свойств кильки через активную (g) и реактивную (β) удельную электропроводность.

Рыбий жир. Рыбий жир относится к группе диэлектриков, поэтому его электрические свойства, а именно относительная диэлектрическая проницаемость (ε) и тангенс угла потерь ($\text{tg} \delta$) измерялись по способу

параллельного включения образца в измерительный контур куметра. Образцы жира, подвергавшиеся исследованию, были получены в витаминном цехе рыбокомбината им. Микояна и представляли сырой жир, еще не прошедший процесса обезвоживания (сушки).

Относительная диэлектрическая проницаемость жира (ϵ) оказалась равной 3,2—3,4. Величина этого параметра показывает, что рыбий жир является диэлектриком с явно выраженной полярностью молекул.

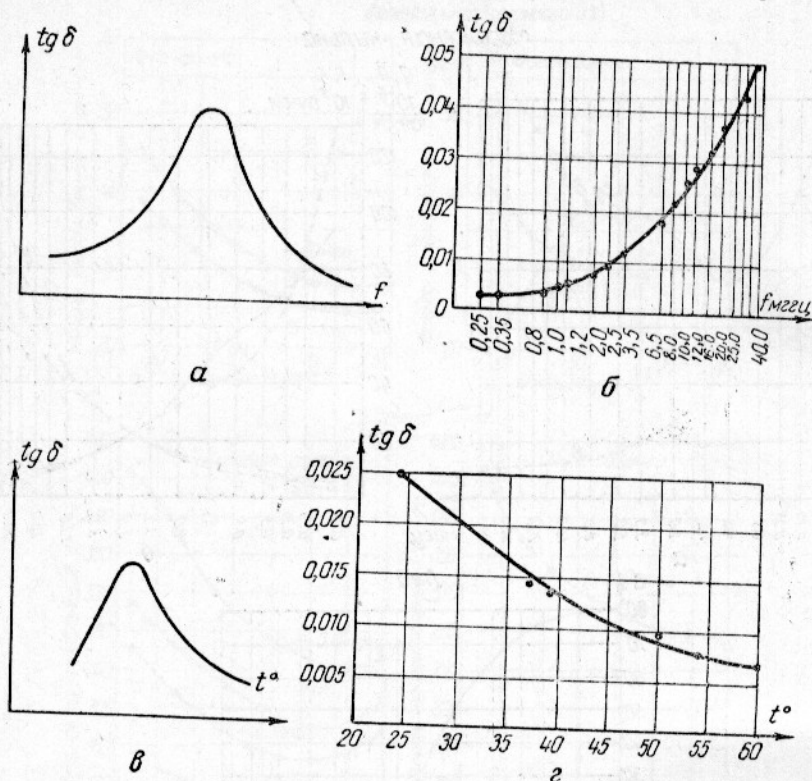


Рис. 13. Зависимость тангенса угла потерь рыбьего жира и подсолнечного масла от температуры и частоты тока.

Величина тангенса угла потерь у подобных материалов очень сильно зависит от частоты тока, как показано на рис. 13,а. Результаты измерения зависимости тангенса угла потерь от частоты тока у рыбьего жира при температуре 22° приводятся на рис. 13,б. Полученная кривая представляет часть левой ветви кривой, изображенной на рис. 13,а; вершина последней кривой и ее правая ниспадающая ветвь находятся за пределами частоты куметра.

У дипольных жидкостей, к которым принадлежит рыбий жир, зависимость тангенса угла потерь от температуры аналогична зависимости его от частоты тока, как показано на рис. 13,в. Проведенные измерения показали, что кривая указанной зависимости для рыбьего жира при температурах от 20 до 120° располагается в области правой (ниспадающей) ветви типичной для дипольных жидкостей кривой (рис. 13,в). Максимум этой кривой для рыбьего жира лежит в области более низких температур.

Подсолнечное масло. Характер изменения электрических свойств у подсолнечного масла такой же, как у рыбьего жира. При температуре 24° и частоте тока около 1 мГц тангенс угла потерь подсолнечного масла

равен 0,003—0,004. С увеличением частоты тока тангенс угла потерь возрастает и при частоте 35 мггц достигает 0,05, т. е. повышается более, чем в 10 раз.

Зависимость тангенса угла потерь подсолнечного масла от температуры измерялась при частоте тока 10 мггц. С повышением температуры от 20 до 60° тангенс угла потерь падает от 0,025 до 0,007, как видно из рис. 13,г. Диэлектрическая проницаемость подсолнечного масла в указанных пределах частоты тока и температуры заметно не меняется и равняется 3,2.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика измерения при помощи куметра типа КВ-1 электрических свойств некоторых рыбных продуктов и материалов, применяющихся в рыбной промышленности.

2. Определено удельное сопротивление растворов поваренной соли различной концентрации при частоте тока в пределах от 0,16 до 50 мггц. Установлено, что при увеличении содержания соли в растворе от 0,5 до 25% удельное сопротивление раствора уменьшается с 87 до 3,5 ом-см по кривой, близкой к гиперболе. Зависимости удельного сопротивления раствора от частоты тока не наблюдается.

3. Выявлено удельное сопротивление икры различных видов рыбы в зависимости от содержания в ней соли при температуре от 20 до 100° в диапазоне частот от 0,16 до 48 мггц (с интервалами от 0,2 до 5 мггц). При этом установлено, что:

а) свежая икра разных частиковых рыб имеет одинаковую величину удельного активного сопротивления—410 ом-см, при частоте тока 0,16 мггц;

б) удельное сопротивление свежей икры осетровых рыб в 1,2—1,5 раза выше, чем икры частиковых рыб;

в) с изменением частоты тока от 0,16 до 48 мггц удельное сопротивление икры уменьшается примерно в 2,5 раза;

г) с увеличением солёности икры от 0 до 8% удельное сопротивление ее уменьшается в 10—15 раз;

д) соленая икра разных пород рыб — сазана, леща, щуки, севрюги, осетра и белуги имеет близкую величину удельного сопротивления (50—60 ом-см);

е) при повышении температуры от 20 до 90° удельное сопротивление как свежей, так и соленой икры уменьшается примерно в 1,5 раза.

4. Свежая рыба обладает электрическими свойствами, близкими к свойствам свежей икры.

5. При замораживании рыбы происходит резкое изменение ее электрических свойств. При исследовании каспийской кильки выявлено, что активное удельное сопротивление свежей рыбы имеет величину порядка десятков и сотен ом-см, в то время как у мороженой оно достигает десятков и сотен тысяч ом-см.

6. В рыбьем жире (относящемся к группе диэлектриков) определены диэлектрическая проницаемость, а также тангенс угла потерь в зависимости от частоты тока и температуры продукта. Относительная диэлектрическая проницаемость жира оказалась равной 3,2—3,4.

Величина тангенса угла потерь рыбьего жира сильно изменяется в зависимости от частоты тока и температуры жира. Проведенное исследова-

ние позволяет выявить оптимальную частоту тока, при которой происходит наиболее интенсивный нагрев рыбьего жира. При частоте тока 40—60 мГц рыбий жир нагревается до температуры 130—150° в течение 3—5 мин.

7. Полученные результаты исследования электрических свойств рыбных продуктов показывают, что токи высокой частоты могут быть использованы в рыбной промышленности для размораживания и проварки рыбы и икры, а также сушки или быстрого нагрева рыбьего жира, ввиду чего требуется дальнейшее изучение этих вопросов.