

Температура продукту при досягненні критичного вологовмісту при сушінні в псевдозрідженому шарі менша, ніж при сушінні в нерухомому шарі (для температури повітря 75°C – 65 і 71°C, для температури повітря 65°C – 36 і 55°C, для температури повітря 55°C – 45 і 52°C відповідно).

#### Висновки.

На основі наведених даних, можна зробити висновок, що з метою зменшення енерговитрат на проведення процесу сушіння доцільно використати комбіновану установку, яка складається з сушарки псевдозрідженого шару і стрічкової, або барабанної сушарки. В сушарці псевдозрідженого шару процес проводиться до критичного вологовмісту, а в стрічковій сушарці процес проводиться до заданого вологовмісту.

#### Література

1. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
2. Снежкін, Ю.Ф. Тепломасообмінні процеси під час одержання каротиновмісних порошків: монографія / Ю.Ф. Снежкін, Ж.О. Петрова. – К.:Академ-періодика, 2007. – 162 с.- ISBN 978-966-360-076-5.
3. Гинзбург, А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков – М.: Пищевая промышленность, 1966 – 195 с.

УДК 664.854:633.85:621.3.023

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕКОТОРЫХ МАСЛОСОДЕРЖАЩИХ ПРОДУКТОВ ОТ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ СУШКИ

Берник М.П., канд. техн. наук, доцент  
Технический Университет Молдовы, г. Кишинев

*В работе представлены электрофизические характеристики - тангенс угла диэлектрических потерь и относительная диэлектрической проницаемости для масличных культур, таких как ядра косточек миндаля, плоды облепихи и семена подсолнечника, в зависимости от вариации температуры продукта и ее влажности. Определена зависимость интенсивности электромагнитного поля Т.В.Ч. при условии поддержания постоянного тепловыделения в продукте от основных параметров сушки масличных культур.*

*The paper presents the electrical properties - dielectric loss tangent and relative permittivity of oil-bearing crops such as seed kernels of almonds, sea buckthorn fruits and sunflower seeds, depending on the variation of product temperature and humidity. It was determined the dependence of the intensity of the U.H.F. electromagnetic field, subject to maintain a constant heat in the product, on the basic parameters of oilseeds' drying.*

**Ключевые слова:** масличные культуры, сушка ТВЧ, тангенс угла диэлектрических потерь, относительная диэлектрическая проницаемость.

Известно, что под воздействием электромагнитного поля, влажные масличные культуры нагреваются за счет диэлектрических потерь в продукте. Эти потери в большой степени зависят от относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$ , что является основополагающим для расчета внутреннего источника тепла.

Тепло, выделяемое под воздействием электромагнитных полей Т.В.Ч. ( $Q$ , Вт/м<sup>3</sup>), определяется общеизвестной формулой [1]:

$$Q = 0,555 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot \epsilon' \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot E^2 \quad (1)$$

где  $f$  – частота электромагнитного поля, Гц;

$\epsilon'$  – относительная диэлектрическая проницаемость продукта;

$\operatorname{tg}\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь продукта;

$E$  – напряженность электромагнитного поля, кВ/м.

Таким образом, с целью определения оптимальных параметров процесса сушки Т.В.Ч влажных материалов, в частности маслосодержащего растительного сырья и для обеспечения возможности комплексной автоматизации данного процесса, необходимы сведения об электрофизических параметрах

продуктов и их зависимости от основных характеристик процесса сушки, а именно температуры и влажности материала.

Для исследования последних были использованы образцы облепихи крушиновидной с 9,8 % -ым содержанием масла, ядра косточек миндаля с содержанием масла 48,5 % и семена подсолнечника – 42,3 % масла.

В целях определения зависимости  $tg\delta$  и  $\epsilon'$  от изменения влажности продукта в процессе сушки были подготовлены образцы продукта различных влажностей, а именно:  $0,3 \pm 0,041$ ;  $4,0 \pm 0,214$ ;  $10,0 \pm 4,31$ ;  $15,0 \pm 6,45$ ;  $\text{и } 20,0 \pm 8,62$  %.

Зависимость электрофизических параметров от температуры продукта исследовалось в интервале температур  $20 - 100$  °С с интервалом в  $20$  °С. Отклонение температуры продукта от номинального значения допускалось в пределах  $\pm 2,0$  °С.

Электрофизические зависимости масляных культур исследовались при частоте электромагнитного поля  $27$  МГц, как наиболее оптимальной с точки зрения стабильности тепловыделения в продукте в диапазоне высоких частот [2].

Экспериментальные данные по исследованию электрофизических характеристик масляного растительного и их зависимости от температуры и влажности продукта были обработаны графически и математически с помощью программ „Mathcad 14” и „Microsoft Office Excel 2003”.

### 1. Зависимость $tg\delta$ и $\epsilon'$ от влажности продукта

Маслосодержащее растительное сырьё представляет собой сложную структуру с различными химическими и механическими связями. Для таких продуктов, как указано в [3, 4], установление зависимостей электрофизических параметров продуктов от влажности затруднено. Это и вызвало необходимость в экспериментальном изучении влияния влажности продуктов на их электрофизические параметры.

Зависимость  $tg\delta$  плодов облепихи, ядер миндаля и семян подсолнечника о влажности в пределах  $0 - 20$  % (температуры продукта  $60$  и  $100$  °С) представлено на рис. 1. Из графиков видно что, эта зависимость линейная, причем с ростом влажности растёт и  $tg\delta$ .

Такая зависимость, по нашему мнению, является следствие вариации соотношения между содержанием масла в продукте и влажностью. При относительно низких влажностях продукта значение  $tg\delta$  в большей степени зависит от свойств масла. С ростом влажности растёт и активная проводимость продукта, что способствует и росту  $tg\delta$ . Так как всем исследуемым продуктам свойственно наличие общей компоненты – масла, то и характер кривых зависимости  $tg\delta$  от  $W$  одинаков. В то же время, при той же температуре и влажности продукта, значения  $tg\delta$  разных продуктов различны, что подтверждается различной структурой продукта.

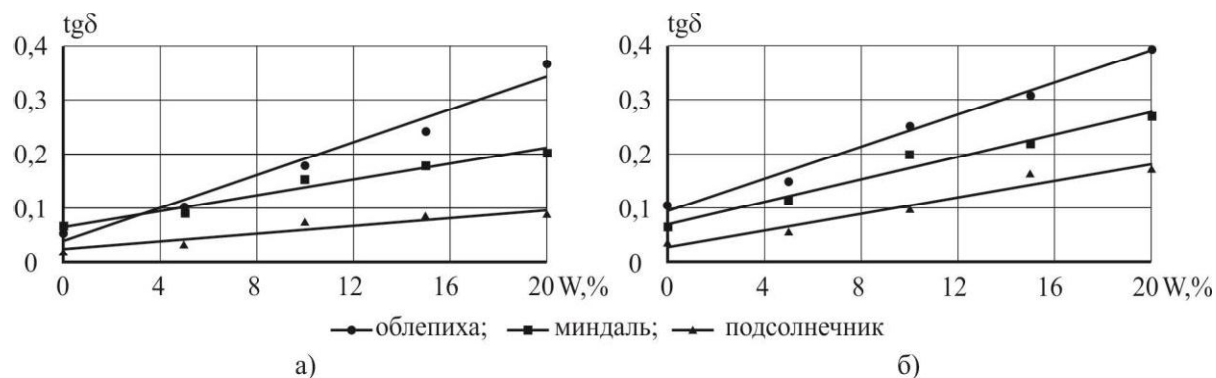


Рис. 1 – Зависимость  $tg\delta$  маслосодержащего растительного сырья от влажности продукта при частоте электромагнитного поля  $27$  МГц и температуры продукта: а)  $60$  °С; б)  $100$  °С

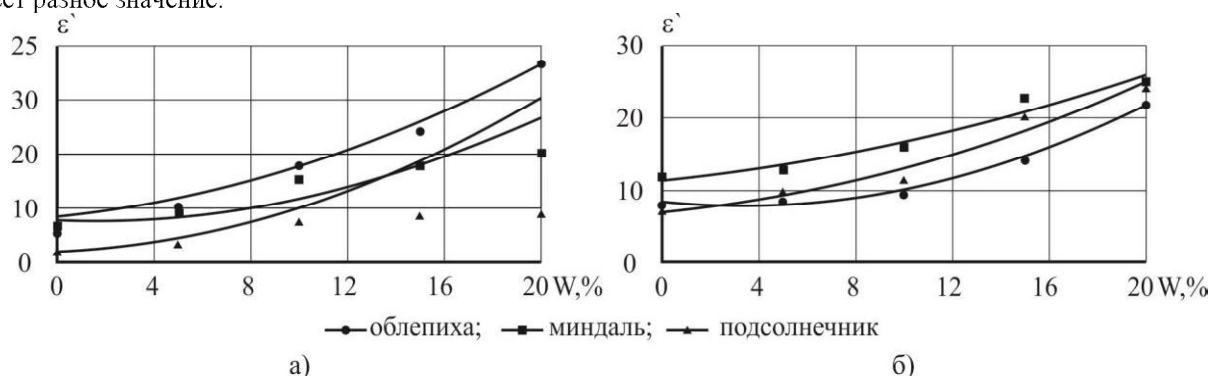
Математическая зависимость  $tg\delta$  от  $W$  для масляных растительных продуктов представлена в таблице 1. Высокие значения коэффициентов корреляции  $0,783-0,903$  подтверждают высокую точность аппроксимации экспериментальных точек математическим моделям.

**Таблиця 1 – Математические зависимости  $tg\delta$  облепихи крушиновидной, ядер косточек миндаля и семян подсолнечника от влажности продукта**

Продукт	Температура продукта, °C	Математическая зависимость	R <sup>2</sup>
Облепиха крушиновидная	60	$tg\delta = 0,0152W + 0,0398$	0.783
	100	$tg\delta = 0,0148W + 0,0961$	0.844
Ядра косточек миндаля	60	$tg\delta = 0,0072W + 0,0666$	0.903
	100	$tg\delta = 0,0104W + 0,0706$	0.852
Семена подсолнечника	60	$tg\delta = 0,0036W + 0,0236$	0.888
	100	$tg\delta = 0,0015W + 0,0126$	0.876

Зависимость  $\epsilon'$  плодов облепихи, ядер миндаля и семян подсолнечника от влажности (для температуры продукта 60 и 100 °C) представлена на рис. 2.

Из графиков (рис. 2) видно, что данная зависимость носит нелинейный характер. Это объясняется сложностью структуры исследуемых продуктов и множеством присутствующих форм поляризации. Рост влажности приводит к увеличению количества поляризуемых молекул воды отнесенных к единице объема продукта и как следствие, к росту  $\epsilon'$ . В то же время, поведение  $\epsilon'$  в большей степени зависит от значимых свойств поляризации молекул воды и в меньшей степени от незначительных свойств поляризации масла. Это наблюдается и на графиках, однако при той же влажности,  $\epsilon'$  для различных продуктов имеет разное значение.



**Рис. 2 – Зависимость  $\epsilon'$  маслосодержащего растительного сырья от влажности продукта при частоте электромагнитного поля 27 МГц и температуре продукта: а) 60 °C; б) 100 °C**

Уравнения регрессии  $tg\delta$  от влажности масляных растительных продуктов представлены в таблице 2. Данные математические зависимости адекватны экспериментальным данным при частоте электромагнитного поля 27 МГц, в пределах влажностей 0 – 20 % и температуры продукта 60 и 100 °C.

**Таблиця 2 – Математические зависимости  $\epsilon'$  облепихи крушиновидной, ядер косточек миндаля и семян подсолнечника от влажности продукта**

Продукт	Температура продукта, °C	Математическая зависимость	R <sup>2</sup>
Облепиха крушиновидная	60	$\epsilon' = 0,0287W^2 + 0,0966W + 8,9669$	0.874
	100	$\epsilon' = 0,0499W^2 - 0,3435W + 8,574$	0.798
Ядра косточек миндаля	60	$\epsilon' = 0,0247W^2 + 0,2111W + 9,3203$	0.883
	100	$\epsilon' = 0,0019W^2 + 0,3399W + 11,407$	0.856
Семена подсолнечника	60	$\epsilon' = 0,0296W^2 - 0,0966W + 8,9669$	0.922
	100	$\epsilon' = 0,029W^2 + 0,3062W + 7,067$	0.917

## 2. Зависимость $tg\delta$ и $\epsilon'$ от температуры продукта

Электрофизические свойства маслосодержащего растительного сырья в большой степени зависят и от температуры продукта. На рис. 3 представлены зависимости  $tg\delta$  плодов облепихи, ядер миндаля и семян подсолнечника от температуры продукта. Данные зависимости представлены в пределах температур 20 – 100 °C для проб с влажностью  $\approx 4$  % (облепиха крушиновидная –  $W=3,93$  %; ядра косточек миндаля

–  $W=3,96$ ; семена подсолнечника –  $W=4,05\%$ .) и  $\approx 20\%$  (облепиха крушиновидная –  $W=19,62\%$ ; ядра косточек миндаля –  $W=19,96$ ; семена подсолнечника –  $W=20,15\%$ .)

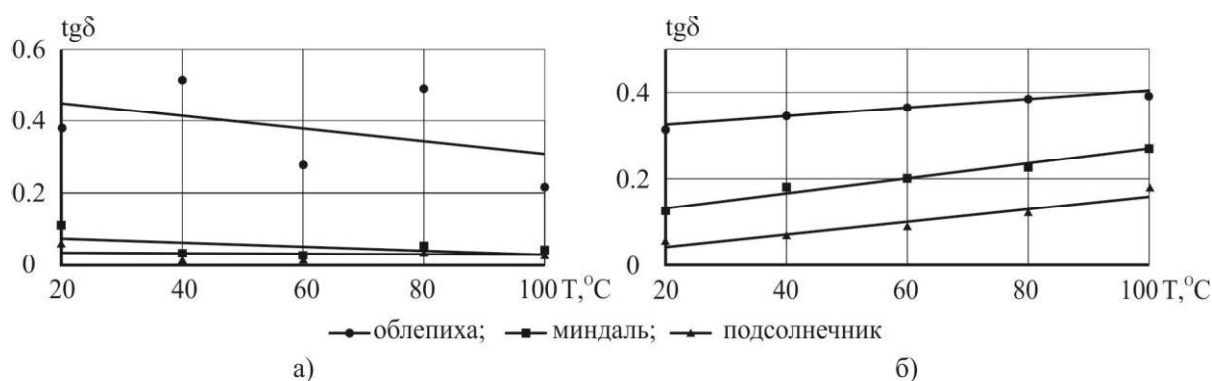
Из графиков видно, что в случае малых влажностей продукта (рис. 3 а), температура слабо влияет на значения  $tg\delta$  маслячных продуктов, более того, с ростом температуры может наблюдаться и некоторое уменьшение его значений.

При повышенных влажностях (рис 3. б) с ростом температуры растут и значения  $tg\delta$ . Такое поведение кривых объясняется тем, что при наличии влаги, с ростом температуры растет и парообразование в капиллярах продукта, которое вытесняет воздух с более выраженными свойствами диэлектрика. Это приводит к росту активной составляющей токов прямой проводимости.

Согласно [1], для материалов со слабой прямой проводимостью, каким является маслосодержащее растительное сырье, математическая зависимость  $tg\delta$  от температуры при малых температурах описывается формулой:

$$tg\delta = \frac{4\pi A e^{-\frac{\beta}{T}}}{\epsilon'_{\infty} f B_1 T} \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B_1$  и  $\beta$  константы;  $\epsilon'_{\infty}$  – поляризация смещения.



**Рис. 3 – Зависимость  $tg\delta$  маслосодержащего растительного сырья от температуры продукта при частоте электромагнитного поля 27 МГц и влажности продукта: а) 4,0 %; б) 20,0 %**

Поляризация смещения, как правило, не зависит от температуры продукта, но зато, при повышении температуры  $e^{-\frac{\beta}{T}}$  растет быстрее чем сама температура. Это и способствует росту  $tg\delta$ .

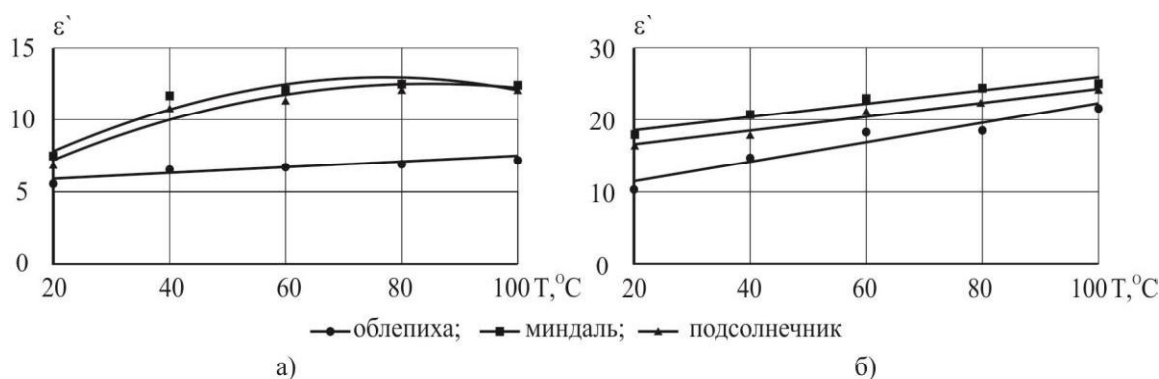
Математические зависимости  $tg\delta$  некоторых маслячных растительных продуктов от температуры представлены в таблице 3. Данные зависимости адекватны при частоте электромагнитного поля 27 МГц, в пределах температур 20 – 100 °С и влажностей продукта 4 и 20 %.

**Таблица 3 – Математические зависимости  $tg\delta$  облепихи крушиновидной, ядер косточек миндаля и семян подсолнечника от температуры продукта**

Продукт	Влажность продукта, %	Математическая зависимость	R <sup>2</sup>
Облепиха крушиновидная	3,93	$tg\delta = -0,0018T + 0,4852$	0,456
	19,62	$tg\delta = 0,001T + 0,3037$	0,981
Ядра косточек миндаля	3,96	$tg\delta = -0,0002T + 0,0519$	0,884
	19,96	$tg\delta = 0,0017T + 0,1003$	0,975
Семена подсолнечника	4,95	$tg\delta = -0,00006T + 0,0364$	0,735
	20,15	$tg\delta = 0,0015T + 0,0126$	0,947

Зависимости  $\epsilon'$  маслосодержащих продуктов от температуры представлены на рисунке 4.

Из графиков видно, что и для малых влажностей продукта (рис. 4. а) и для больших (рис. 4. б), с ростом температуры растут и численные значения  $\epsilon'$ . В то же время, следует отметить, что при влажности продукта 3,93...4,05 % относительная диэлектрическая проницаемость продуктов почти в два раза меньше чем при влажности 19,62...20,15 %.



**Рис. 4 – Зависимость  $\epsilon'$  маслосодержащего растительного сырья от температуры продукта при частоте электромагнитного поля 27 МГц и влажности продукта: а) 4,0 %; б) 20,0 %**

Рост  $\epsilon'$  при повышении температуры продукта обусловлен тем, что от температуры во много зависит продолжительность релаксации, как молекул воды, так и молекул масла. При малых температурах продукта поляризация не успевает заканчиваться полностью за один полупериод приложенного напряжения и  $\epsilon'$  в таком случае мала. При повышении температуры продолжительность поляризации уменьшается, за один полупериод приложенного напряжения сама поляризация успевает заканчиваться в большей степени и  $\epsilon'$  растет.

Математические зависимости  $\epsilon'$  некоторых масляных растительных продуктов от температуры представлены в таблице 4. Данные зависимости адекватны при частоте электромагнитного поля 27 МГц, в пределах температур 20 – 100 °С и влажностей продукта 4 и 20 %.

**Таблица 4 – Математические зависимости  $\epsilon'$  облепихи крушиновидной, ядер косточек миндаля и семян подсолнечника от температуры продукта**

Продукт	Влажность продукта, %	Математическая зависимость	R <sup>2</sup>
Облепиха крушиновидная	3,93	$\epsilon' = 0,0195T + 5,485$	0,942
	19,62	$\epsilon' = 0,133T + 8,887$	0,940
Ядра косточек миндаля	3,96	$\epsilon' = -0,0015T^2 + 0,2379T + 3,6763$	0,936
	19,96	$\epsilon' = 0,0895T + 16,765$	0,954
Семена подсолнечника	4,95	$\epsilon' = 0,0013T^2 + 0,2143T + 3,408$	0,987
	20,15	$\epsilon' = 0,0945T + 14,693$	0,986

Полученные графические и математические электрофизические параметры исследуемых масляных растительных продуктов от температуры и влажности позволяют определить необходимую мощность внутреннего источника тепла для получения нужной температуры находящейся в интервале исследуемых температур.

### 3. Определение оптимальной напряженности электромагнитного поля

Генератор Т.В.Ч. для сушильных установок выбирается исходя из частоты электромагнитного поля и мощности или интенсивности создаваемого электромагнитного поля.

Частота электромагнитного поля генератора выбирается из параметрического ряда частот промышленных генераторов исходя из электрофизических характеристик, таким образом, чтобы при данной частоте имело место максимальное тепловыделение и обеспечивалась наибольшая стабильность тепловыделения в продукте в диапазоне высоких частот. Согласно [2], оптимальная частота электромагнитного поля для сушки исследуемых масляных продуктов являются 27 МГц.

Интенсивность электромагнитного поля является функцией от электрофизических и теплофизических свойств продуктов, температуры и влажности и может быть определена из формулы (1):

$$E = \sqrt{\frac{Q}{0,555 \cdot 10^{-6} \cdot f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot \epsilon'}} \quad (3)$$

Внутренний источник тепла  $Q$ , необходимый для обеспечения процесса сушки определяется согласовано теплового баланса:

$$Q = (Q_1 + Q_2) k_p \quad (4)$$

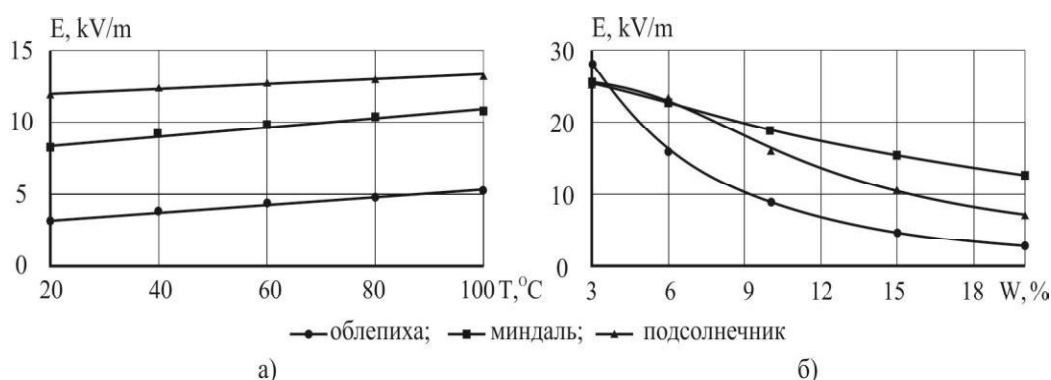
где  $Q_1$  – количество тепла расходуемого на нагрев материала, Дж;

$Q_2$  – количество тепла расходуемого на испарение влаги, Дж;

$k_p$  – коэффициент, учитывающий потери тепла.

На базе расчетов, согласно формуле (3), была получена зависимость интенсивности электромагнитного поля от температуры  $E = f(T)$ , для влажности продуктов 20 % (рис. 5 а) и зависимость напряженности от влажности  $E = f(W)$ , для температуры продуктов 60 °С (рис. 5 б).

Из графиков представленных на рис. 5. а) видно, что с ростом температуры продукта  $E$  растет. Увеличение количества тепла за счет внутреннего источника с ростом температуры возможно за счет роста интенсивности электромагнитного поля. В то же время, следует отметить, что скорость изменения произведения  $tg\delta$  и  $\epsilon'$  в зависимости от роста температуры продукта ( $\nu_{(tg\delta, \epsilon')} = f(T)$ ) находилась в пределах 0,0403... 0,0645 °С<sup>-1</sup>, а скорость изменения напряженности электромагнитного поля в зависимости от той же температуры ( $\nu_E = f(T)$ ) – в пределах 0,1295...0,1835 kV/m°С, то есть увеличивается почти в три раза быстрее. Это указывает на то, что интенсивность электромагнитного поля зависит не только от электрофизических параметров продукта, но и от других: теплофизических (теплоемкость, теплопроводность, и др.), механических (объемная масса, механическая структура) которые также являются функциями температуры.



**Рис. 5 – Зависимость интенсивности электромагнитного поля от: а) температуры маслосодержащего растительного сырья с влажностью 20 %; б) влажности продукта при температуре 60 °С.**

Зависимость интенсивности электромагнитного поля от влажности для случая температуры маслосодержащего растительного сырья 60 °С представлена на рис. 5 б). Из графика видно, что с ростом влажности продукта, напряженность электромагнитного поля, необходимого для поддержания постоянной температуры продукта (в нашем случае 60 °С) падает, причём по нелинейному закону. Это обосновано тем, что с ростом влажности больше полярных молекул воды участвуют в процессе поляризации, а значит, при одной и той же напряженности поля выделяется больше тепла.

#### Выводы

1. С ростом влажности продукта тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость маслосодержащего растительного сырья растут, причем этот рост обусловлен ростом полярных молекул воды в объеме продукта и изменением соотношения масло-вода.
2. Рост температуры маслосодержащего растительного сырья способствует росту диэлектрической проницаемости продуктов независимо от их влажности. Тангенс угла диэлектрических потерь с ростом температуры растет только при больших влажностях продукта, при малых влажностях температура продукта на  $tg\delta$  практически не влияет.
3. Напряженность электромагнитного поля является функцией, как от электрофизических, так и от их теплофизических параметров масличных продуктов. С ростом температуры продукта напряженность поля растет, а с ростом влажности, уменьшается.

#### Литература

1. Сканава Г.И. Физика диэлектриков (область слабых полей). –М. –Л.: Госиздат технико-теоретической литературы, 1949. 497 с.
2. Lupaşco A., Bernic M., Ţislinscaia N., Răducan M. Uscarea cătinii albe în câmp UHF. Ch.: UTM, 2007, – 202 p.
3. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. –М.: Энергоиздат, 1982. –320 с.

4. Емельянов О.А. Особенности релаксационной поляризации диэлектрика в области больших электротепловых нагрузок. // Письма в ЖТФ, Т.28, Вып.22. 2002. –с. 32-38.

УДК 664.8.047.014

## ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКІСНОГО ВМІСТУ ПЕКТИНОВИХ РЕЧОВИН В РОСЛИННІЙ СИРОВИНІ, РОЗРОБКА МЕТОДИКИ

Петрова Ж.О. канд.техн.наук  
Снєжкін Ю.Ф. д-р техн. наук, професор  
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

*У статті проаналізовані найбільш поширені методи визначення суми пектинових речовин. Представлено новий метод визначення загальної кількості пектинових речовин в сухій рослинній сировині. Визначено загальну кількість пектинових речовин, за новою методикою в рослинних порошках.*

*The article analyzed the most common methods for determining the amount of pectin substances. Was presented the new method of determining the total number of pectin substances in dry plant material. Determined the total number of pectin substances by a new method in plant powders.*

**Ключові слова:** галактуронова кислота, пектинові речовини, екстрагування, харчові порошки.

Постановка проблеми. Пектинові речовини знаходяться в міжклітинних тканинах та оболонках клітин всіх вищих рослин. В більшості рослин, особливо в недозрілих фруктах, їх основна частина знаходиться у водо нерозчинній формі, яку ще називають протопектинами.

Встановлено, що пектинові речовини належать до високомолекулярних вуглеводів і представляють собою полімергомологічний ряд частково метаксилірованої галактуронової кислоти, зв'язаної безпосередньо  $\alpha - 1 \rightarrow 4 -$  глікозидних зв'язків. Із нейтральних цукрів в їх складі домішують D-галактоза, L-арабіноза і L-рамноза, менше міститься D-ксилози, L-фруктози, 2-O-метил- D-ксилози і 2-O-метил- L-фруктози. Частково вони зустрічаються у вигляді арабанів, галактанів та арабіно-галактанів [1].

Склад пектинових речовин рослин характеризується різним співвідношенням кислих та нейтральних фракцій, вмістом залишків галактуронової кислоти та нейтральних моноцукрів. Це пояснюється тим, що хімічний склад цих речовин та якісні показники неоднакові у різних рослин. Їх органів та тканин. Значним змінам підлягають пектинові речовини в період формування та дозрівання рослин. В цей період, під впливом комплексу пектолітичних ферментів відбуваються зміни у співвідношеннях їх фракцій і ступеня метоксилірування, ацетилірування, молекулярної маси [1].

Єдиної думки відносно хімічного складу пектинових речовин поки що нема. Кінцево встановленим можна вважати лише той факт, що основною структурною одиницею пектинів є D- галактуронова кислота, яка в основному і визначає їх властивості [2]. Завдяки цим властивостям, кількісне визначення пектинових речовин нараховує багато методів, вони трудомісткі та мають між собою велику похибку.

Метою статті є розробка методу кількісного визначення суми пектинових речовин у сухій рослинній сировині. Найбільш поширений метод визначення пектинових речовин є кальцій-пектатний, або об'ємний із сірчанокислою міддю. Ці методи потребують значної кількості дослідного матеріалу, що утруднює фільтрування та призводить до часткової втрати пектину. Крім того використання кальцій пектатного методу не дозволяє прослідкувати за всім ходом гідролітичного розщеплення, так як низькомолекулярні фрагменти частково деградованого пектинового матеріалу не осаджуються катіонами полівалентних металів.

Поширеним способом кількісного визначення пектинів є метод аналізу оснований на взаємодії продуктів кислотного гідролізу пектинів з карбазолом. Забарвлені продукти взаємодії аналізуються фотокolorиметричним способом [3]. Недоліками способу є: трудоємність аналізу, необхідність проведення кислотного гідролізу концентрованими кислотами, висока похибка (біля 3,5%), вплив нейтральних цукрів на результати аналізу пектина.

Відомий спосіб екстрагування та перетворення в розчинний стан пектинових речовин із рослинної сировини з подальшим визначенням у ньому концентрації пектинів. Для цього з 25 г вологого або 10 г сухого дослідного матеріалу екстрагують спочатку водорозчинні пектини, шляхом поступової 3-х кратної екстракції водою при 40 °С, а потім протопектини шляхом поступового екстрагування спочатку 0,3н водним розчином соляної кислоти при 100 °С, а потім 1 % водним розчином лимоннокислого амонію при 100 °С [4].