

REFRIGERATION, FREEZING AND THAWING

THE XXth EUROPEAN MEETING OF MEAT RESEARCH INSTITUTES
 THE ALL-UNION RESEARCH INSTITUTE OF MEAT INDUSTRY USSR
 SOME PECULIARITIES OF HEAT- AND MASS-TRANSFER DURING MEAT THAWING
 IN SHF-CURRENT FIELD
 I.A.ROGOV, S.V.NEKROUTMAN, E.G.TOURYANSKY, V.A.YASYREVA

SUMMARY

Experimental results are discussed on meat thawing in SHF-electric field ($f=2,375$ Mos). Estimates of energy consumption for thawing are presented. The rate of heating is shown to depend on absorption coefficient and specific heat of the sample, which change in the process of thawing. The results of measuring beef muscle dielectric properties within the range from -20 up to 0°C and heating rate calculations are given.

The process of heat- and mass-transfer is demonstrated for thin samples. The solution of the problem characterizing thawing kinetics and the analytical description of the relationships of temperature and water content to time are derived.

RESUME

On a analysé les résultats des études de la décongelation de la viande dans le champ électrique de HH.F ($f = 2375$ MHz). On a amené les calculs des frais énergétiques pour le processus de la décongelation. Il est démontré que la vitesse de l'échauffement dépend du coefficient de l'absorption et de la chaleur spécifique de l'échantillon qui varient au cours de la décongelation. On a montré les résultats des mesurages des propriétés diélectriques des muscles du boeuf dans la plage de températures de -20 à 0°C et on a donné les calculs de la vitesse de l'échauffement.

Il est montré le processus du transfert de chaleur et de masse pour les échantillons minces. On a résolu le problème caractérisant la cinétique du processus de la décongelation et la description analytique des rapports de la températures et de la teneur en eau en fonction du temps.

DER XX. EUROPAISCHE KONGRESS DER FLEISCHFORSCHUNGSINSTITUTE
 ALLUNIONS-FORSCHUNGSINSTITUT DER FLEISCHWIRTSCHAFT DER VASSR
 EINIGE BESONDERHEITEN DER WÄRME- UND MASSESÜBERTRAGUNG BEIM
 FLEISCHAUFTAUBEN IM ELEKTRISCHEN UBERHOCHFREQUENZFELD
 (UHF)
 I.A.ROGOV, S.V.NEKROUTMAN, E.G.TURJANSKIJ, W.A.JASSJIREWA

ZUSAMMENFASSUNG

Die Untersuchungsergebnisse beim Fleischauftauen im elektrischen UHF-Feld ($f=2375$ MHz) wurden studiert. Der Energieverbrauch für Auftauvorgang wurde errechnet. Es wurde festgestellt, dass das Erwärmungstempo vom Absorptionskoeffizienten und von der spezifischen Wärmekapazität abhängt, die sich während des Auftauvorganges ändern. Die Ergebnisse der Messung von dielektrischen Eigenschaften des Rindermuskelgewebes wurden für Temperaturgrenzen von -20 bis 0°C angeführt und die Berechnung des Erwärmungstempes gegeben.

Die Wärme- und Massenübertragung in dünnen Fleischmustern wurde gezeigt. Es wurden die Lösung der Aufgabe, die die Kinetik des Auftauvorganges charakterisiert, erhalten sowie die Abhängigkeit der Temperatur und des Wassergehaltes von der Zeit analytisch beschrieben.

XX ЕВРОПЕЙСКИЙ КОНГРЕСС РАБОТНИКОВ НИИ МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
 ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
 МЯСНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ СССР
 НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОСА ПРИ РАЗ-
 МОРАЖИВАНИИ МЯСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ СВЧ
 И.А.РОГОВ, С.В.НЕКРУТМАН, Э.Г.ТУРЯНСКИЙ, В.А.ЯСЫРЕВА

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены результаты исследований по размораживанию мяса в электрическом поле СВЧ ($f = 2375$ МГц). Приведены расчеты энергозатрат на процесс размораживания. Показано, что темп нагрева зависит от коэффициента поглощения и удельной теплоемкости образца, которые изменяются в процессе размораживания. Приводятся результаты измерений диэлектрических свойств мышечной ткани говядины в диапазоне температур от -20 до 0°C и даны расчеты темпа нагрева.

Показан процесс тепло- и массопереноса для тонких образцов. Получены решение задачи, характеризующее кинетику процесса размораживания, и аналитическое описание зависимостей температуры и влагосодержания от времени.

REFRIGERATION, FREEZING AND THAWING

Размораживание пищевых продуктов занимает значительное место в технологических процессах пищевых производств.

Процесс размораживания продуктов при внешнем подводе тепла занимает продолжительное время. При этом теряются питательные и вкусовые качества продукта. Размораживание в СВЧ-поле позволяет во много раз ускорить процесс и, соответственно, снизить потери и сохранить качество пищевых продуктов.

В процессе размораживания мяса и мясопродуктов энергия СВЧ поля расходуется в основном на нагревание образца, поскольку в диапазоне температур от -20 до 0°C потери на испарение можно пренебречь. Тогда удельную мощность ($P_{уд}$) можно представить формулой:

$$P_{уд} = 4,17c\rho \frac{\Delta t}{\Delta \tau}, \frac{Bm}{cm^3} \quad (1)$$

где ρ - плотность образца;
 c - удельная теплоемкость;
 $\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$ - средний темп нагрева.

С другой стороны для $P_{уд}$ можно написать:

$$P_{уд} = 0,556 E^2 f \varepsilon'' 10^{-12} \frac{Bm}{cm^2} \quad (2)$$

Из (1) и (2) формул получаем для среднего темпа нагрева:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = 0,132 \cdot 10^{-12} \frac{f E^2}{\rho c} \frac{\varepsilon''}{c}, \frac{град}{с} \quad (3)$$

В процессе размораживания плотность образца изменяется незначительно, также практически не меняются f и E поэтому вместо (3) можно написать:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} \approx const \cdot \frac{\varepsilon''}{c} \quad (4)$$

на с окружающей средой имеют большую скорость нагрева (это справедливо для образцов небольших размеров и массы). Поэтому следует ожидать изменения среднего темпа нагрева не в 4 раза, а несколько больше.

На рис. 1а показана схема расположения термодпар в образце, а на рис. 1б - экспериментально полученные данные зависимости температуры от времени в процессе размораживания для мышечной ткани мяса (говядина, масса 0,35 кг) при колебательной мощности СВЧ-генератора 1,0 кВт на частоте 2375 мгц. Для точек, расположенных на достаточной глубине, темп нагрева к концу процесса размораживания возрастает (точки 0, а, а') от 5-6 град/мин. до 20-22 град/мин. Периферийные области образца уже в начале процесса размораживания имеют более высокую температуру (точки в, в').

Рассмотрим тепло- и массоперенос при размораживании образца мяса, имеющего форму тонкой пластины (на примере быстрозамороженных порционных кусков - лангета, бифштекса, антрекота и т.п.), у которого отношение $\frac{d}{h} \gg 1$ (d - диаметр, h - толщина).

Для такого образца в первом приближении можно допустить следующее:

- различие температуры и влагосодержания по толщине настолько невелико, что им можно пренебречь;
 - избыточное давление в образце вследствие незначительной его толщины настолько мало, что его можно не учитывать;
 - СВЧ-поле по сечению образца можно считать однородным;
 - вследствие незначительной толщины образца и большой глубины проникновения СВЧ-поля для замороженного мяса (при $t = -20^\circ C$, $d \gg 30$ см) можно считать поле однородным во всех точках образца.
- Правомочность указанных допущений подтверждена экспериментальными проверками.

С учетом указанных допущений задача сводится к нахождению зависимостей температуры и влагосодержания в зависимости от времени в процессе размораживания.

Для решения задачи используется следующий феноменологический метод. Поскольку величины t и u являются функциями только времени, то вполне допустимо применить интегральное уравнение тепло- и массопереноса, предложенное А.В.Лыковым [1]:

Выражение (4) показывает, что темп нагрева при размораживании определяется, в основном, значением коэффициента поглощения и удельной теплоемкостью образца.

При размораживании вся масса замороженной в мясе влаги превращается в воду, за счет чего следует ожидать существенного изменения значений ε'' и C .

Поскольку влагосодержание мяса весьма велико, а удельная теплоемкость воды в два раза выше, чем льда, то в процессе размораживания теплоемкость мяса должна также возрасти в среднем в два раза.

Изменение величины ε'' в результате размораживания должно быть еще более значительным, что можно объяснить увеличением проводимости и подвижности ионов.

Ниже приведены данные по значению ε'' для мышечной ткани говядины (плечевая часть) в диапазоне температур от -30 до 0°C.

Коэффициент поглощения (ε'') мышечной ткани говядины на частоте 2375 мгц

$t, ^\circ C$	-30	-25	-20	-15	-10	-5
ε''	0,14	0,17	0,24	0,37	0,63	1,32

Поскольку ε'' возрастает более интенсивно, чем C , то в диапазоне температур от -20 до 0°C следует ожидать увеличения темпа нагрева.

Отношение темпа нагрева в конце процесса размораживания ($\frac{\Delta t}{\Delta \tau}_{кон.}$) к темпу нагрева в начале процесса размораживания ($\frac{\Delta t}{\Delta \tau}_{нач.}$), исходя из выражения (4), можно представить следующим выражением:

$$\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)_{кон.} : \left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau}\right)_{нач.} \approx \frac{\varepsilon''_{0^\circ}}{\varepsilon''_{-20^\circ}} \frac{C_{нач.}}{C_{кон.}} \approx \frac{1}{2} \frac{\varepsilon''_{0^\circ}}{\varepsilon''_{-20^\circ}}$$

Если в процессе размораживания от -20 до 0°C значение ε'' растет в 8 раз, то темп нагрева должен возрасти примерно в 4 раза. Такое изменение темпа нагрева характерно для внутренних слоев образца, поскольку внешние слои в результате интенсивного тепло-

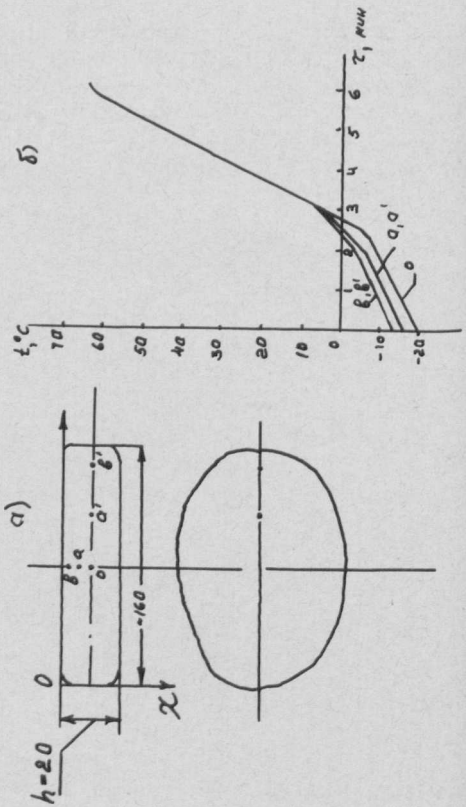


Рис. 1. Размораживание мышечной ткани мяса (говядина, плечевая часть, масса 0,35 кг, $f = 2375$ мгц, $P_{свч} = 1,0$ кВт): а - схема расположения термодпар; б - экспериментальные зависимости t (°C) от времени t (мин).

REFRIGERATION, FREEZING AND THAWING

$$q(\tau) = \tau \rho_0 R \frac{d\bar{u}}{d\tau} + c \rho_0 R_v \frac{d\bar{t}}{d\tau}, \quad (6)$$

- где $q(\tau)$ - поток тепла, проходящий через поверхность образца;
 ρ_0 - удельная теплота парообразования;
 R_v - плотность;
 c - отношение объема образца к его поверхности;
 \bar{t}, \bar{u} - приведенная удельная теплоемкость;
 \bar{t}, \bar{u} - средние температура и влагосодержание по объему образца.

$$p(\tau) = \tau \rho_0 \frac{d\bar{u}}{d\tau} + c \rho_0 \frac{d\bar{t}}{d\tau} \quad (7)$$

При постоянной мощности генератора СВЧ-колебаний можно записать:

$$p = const = \tau \rho_0 \frac{d\bar{u}}{d\tau} + c \rho_0 \frac{d\bar{t}}{d\tau} \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что если одно из слагаемых в правой части постоянно, то постоянной величиной будет и другое. Экспериментально доказано, что слагаемое $\tau \rho_0 \frac{d\bar{u}}{d\tau}$ для тонких образцов в процессе размораживания изменяется мало (2-3%). Скорость испарения, т.е. количество жидкости m_e , переходящее в пар в единицу времени, определяется по формуле (9):

$$c \rho_0 \frac{d\bar{t}}{d\tau} = c_2 \quad (14)$$

Постоянная c_2 характеризует средний темп нагрева образца в процессе размораживания. Выражения (12) и (14) представляют собой уравнения для нахождения зависимостей $\bar{t}(\tau)$ и $\bar{u}(\tau)$. Начальные условия:

$$\bar{t}(\tau=0) = \bar{t}_0; \quad \bar{u}(\tau=0) = \bar{u}_0 \quad (15)$$

Величина \bar{t}_0 равняется начальной температуре, при которой образец помещается в камеру СВЧ-аппарата; \bar{u}_0 - начальное влагосодержание ($\bar{u} = 2,3-2,4$).

$$\bar{u} = \bar{u}_0 - \frac{c_1}{\tau} \quad (16)$$

$$\bar{t} = \bar{t}_0 + \frac{c_2}{c \rho_0} \tau \quad (17)$$

Они показывают линейный спад влагосодержания и рост температуры. Из уравнений (12) и (14) следует, что отношение $\frac{c_2}{c_1}$ имеет

$$\frac{c_2}{c_1} = \left| \frac{c}{2} \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} \right| \quad (18)$$

Согласно (1) эта величина является критерием Ребиндера ($\frac{c}{2} = R_e$), характеризующим отношение тепловых затрат на нагревание образца, к затратам на испарение влаги.

$$m_e = \frac{A S}{\rho_0} (\rho_n - \rho), \quad (9)$$

- где A - постоянная, зависящая от геометрии образца;
 S - площадь свободной поверхности образца;
 ρ_0 - барометрическое давление;
 ρ_n - давление насыщенных паров;
 ρ - давление паров жидкости над свободной поверхностью.

В условиях размораживания, когда избыточное давление в образце практически отсутствует, можно считать, что

$$\rho_n \approx \rho_0, \quad \rho \approx 0. \quad (10)$$

Тогда из уравнения (9) следует:

$$m_e \approx A S = const \quad (11)$$

Разделив m_e на массу сухого вещества m_c , можно получить скорость изменения влагосодержания $\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ - постоянную при постоянной m_e . Учитывая, что ρ_0 и τ также постоянные величины, можно записать:

$$\tau \rho_0 \frac{d\bar{u}}{d\tau} = -c_1 \quad (12)$$

Знаком минус учитывается убывание влагосодержания во времени ($\frac{d\bar{u}}{d\tau} < 0$).

Согласно уравнениям (11) и (12) значение константы c_1 , определяется как

$$c_1 = \tau \rho_0 \frac{A S}{m_c} \quad (13)$$

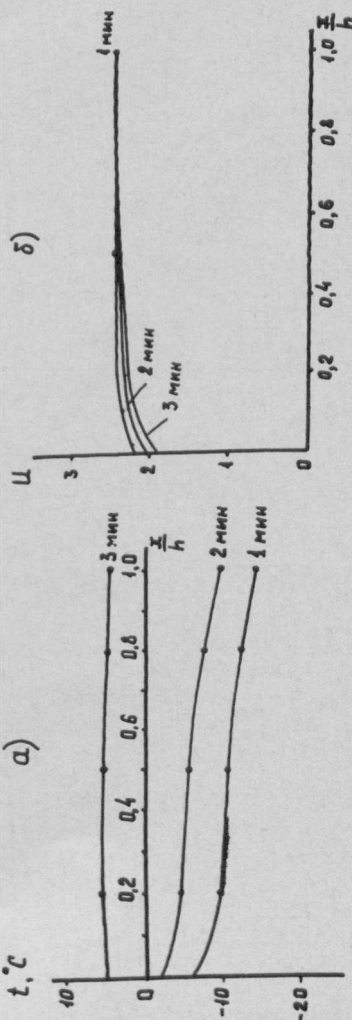


Рис. 2. Температура (а) и влагосодержание (б) различных слоев образца (геометрия образца см. рис. 1) после 1, 2 и 3 мин. размораживания

REFRIGERATION, FREEZING AND THAWING

Отношение $\frac{C_2}{P}$ можно считать мерой оценки эффективности использования СВЧ-энергии в процессе размораживания (η):

$$\eta = \frac{C_2}{P} = \frac{1}{1 + R_g} \quad (19)$$

Значение R_g может быть найдено экспериментально для различных случаев размораживания и геометрии образца.

Запишем уравнение (18) в виде

$$R_g = \frac{C_2}{C_1} = \frac{C}{\tau} \left| \frac{dt}{d\tau} : \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| \quad (20)$$

Отсюда видно, что определение R_g сводится к нахождению темпов нагрева и убыли влаги при известных τ и C .

На рис. 2 показаны зависимости температуры и влагосодержания в различных слоях образца. Из кривых видно, что эти значения мало зависят от координаты и могут быть заменены усредненными значениями \bar{t} и \bar{u} .

Таким образом, указанное выше рассмотрение хорошо согласуется с экспериментом и может быть использовано для:

- аналитического описания зависимостей температуры и влагосодержания от времени при размораживании образцов в электрическом поле СВЧ;
- быстрой оценки кинетики процесса размораживания с учетом геометрии образца;
- расчета режима размораживания и экономической оценки процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дыков А.В. Теория сушки. М., изд. "Энергия", 1968.
2. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М., изд. "Наука", 1968.