

Акустический метод исследования и его применение для оценки
механических свойств мяса при холодильной обработке и хранении
Н.А. ГОЛОВИЧИ, С.А. КРУЧЕВ
Ленинградский технологический институт холодильной промышленности, Ленинград, ССР

Совершенствование технологии мяса и мясопродуктов требует применения современных методов исследования, одним из которых является акустический. Данный метод еще не получил широкого распространения в научно-исследовательской практике в связи с недостатком специальных приборов и устройств, а также данных об особенностях распространения упругих волн в мышечной ткани.

Чтобы решить проблему дальнейших работ в этом направлении. Акустические свойства проявляются при приложении к продукту гармонического поля деформации. При этом в исследуемом образце возникают упругие возмущения, причем, в хилой базе будут распространяться продольные волны, в твердообразной фазе в зависимости от частоты, физических свойств и геометрических размеров возможны образования различных типов волн: продольных, поперечных и других. При распространении упругих волн в мышечной ткани уравнение движения для смещения частиц продукта можно записать [1]

$$\rho \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - (\epsilon' + j\epsilon'') \omega^2 u \right) = 0 \quad (1)$$

где ρ - действительный и минимум компоненты модуля упругости; ω - дифференциальный оператор. Данный процесс будет характеризоваться двумя основными параметрами: скоростью звука c и его затуханием α , значение коэффициента зависит от энергии меж- и внутримолекулярных связей, механической свободной и связанный воды, энергии связи воды с компонентами структуры и прочего.

В общем виде c и α для широкого диапазона частот можно выразить [2]

$$\frac{c^2}{\rho} = C_0 \left[1 + \frac{1}{\rho c^2} \left(\sum_{j=1}^n \frac{C_{ij} \cdot \omega \tilde{e}_{ij}^2}{1 + \omega^2 \tilde{e}_{ij}^2} + \sum_{j=1}^n \frac{K_m \cdot \omega \tilde{e}_{ij}^2}{1 + \omega^2 \tilde{e}_{ij}^2} + \sum_{j=1}^n \frac{\omega \tilde{e}_{ij}^2 \cdot x_0 \rho \Delta}{1 + \omega^2 \tilde{e}_{ij}^2} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\alpha}{\rho} = \frac{1}{\rho c^2} \left[\sum_{j=1}^n \frac{C_{ij} \omega \tilde{e}_{ij}^2}{1 + \omega^2 \tilde{e}_{ij}^2} + \sum_{j=1}^n \frac{K_m \cdot \omega \tilde{e}_{ij}^2}{1 + \omega^2 \tilde{e}_{ij}^2} + \sum_{j=1}^n \frac{x_0}{1 + \omega^2 \tilde{e}_{ij}^2} \right] \quad (3)$$

где c - скорость волны при высокой частоте ω ; C_0 - скорость волны при низкой частоте ω_0 ; ρ - плотность; Δ - время релаксации; \tilde{e}_{ij} - модуль сдвига; K_m - изотермический модуль всестороннего давления; x - длина волны; x_0 - коэффициент температуропроводности. Первые, вторые и третьи слагаемые в скобках представляют собой поправки к c и α , связанные с различными механизмами релаксации из уравнения (1) c имеет комплексный характер. Связь между скоростью звука, его положением и компонентами комплексного модуля для любого типа волны определяется выражениями (2)

$$\epsilon' = \rho c^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha}{\rho c^2} \right)^2 \right] / \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\rho c^2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\epsilon'' = \rho c^2 \left(\frac{\alpha}{\rho c^2} \right) / \left[1 + \left(\frac{\alpha}{\rho c^2} \right)^2 \right]^2 \quad (5)$$

Если рассчитать и представить графически (рис. 1) функции $c''/\epsilon'' = f(E'/E)$ (кривая 1) и $\alpha/\rho c^2 = f(E'/E)$ (кривая 2), где E' - соответственно скорость, обусловленные действительным и минимумом, то при $\alpha/\rho c^2 \leq 1$ с погрешностью не более 5% можно пользоваться формулой

$$c = \sqrt{E'/\rho} \quad (6)$$

Учитывая положения теории упругости [3] можно связать механические постоянные и скорости различных типов волн. На рис. 2 приведены рассчитанные на ЭВМ зависимости, связывающие коэффициент Пуассона ν с отношениями скоростей C_{00}/C_0 , C_{0L}/C_0 , C_{0T}/C_0 , где индекс 0 относится к продольной, стержневой, поверхностной, поперечинчатой, поперечной волнам.

Рис. 1. Зависимости Relations
 $c''/\epsilon'' = f(E'/E)$ (1);
 $\alpha/\rho c^2 = f(E'/E)$ (2)

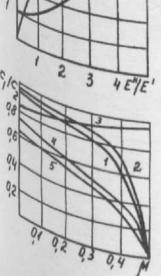


Рис. 2. Зависимости Relations
1 - $C_{00}/C_0 = f(\nu)$; 2 - $C_{0L}/C_0 = f(\nu)$;
3 - $C_{0T}/C_0 = f(\nu)$; 4 - $C_{0P}/C_0 = f(\nu)$;
5 - $C_{0S}/C_0 = f(\nu)$;

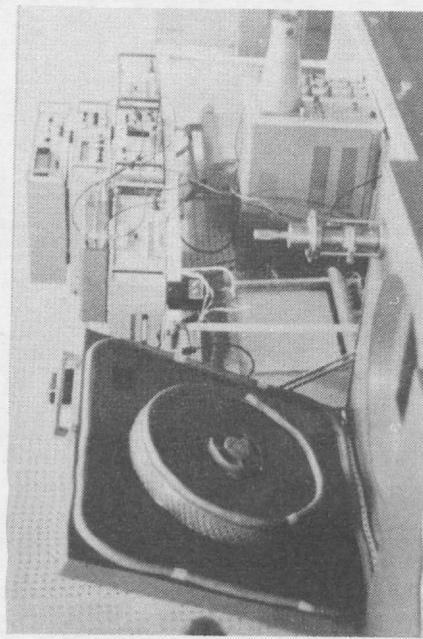


Рис. 3. Общий вид установки для исследования акустических свойств мяса и мясопродуктов
Fig. 3. Flow sheet of the installation for investigating acoustic properties of meat and meat products.

На основе двух определенных скоростей акустических колебаний можно определить ν мышечной ткани. Для исследования акустических свойств мяса и мясопродуктов в проблемной лаборатории ЛТИИ собрана автоматическая установка, внешний вид которой представлен на рис. 3. С помощью данной установки исследованы акустические свойства мяса в зависимости от частоты упругих волн и условий холодильной обработки и хранения.

Анализ дисперсионных характеристик скорости звука в диапазоне частот $10^3 - 10^4$ Гц показал, что при высоких частотах скорость распространения упругих волн близка к скорости в мышечной плазме ($1570 - 1590$ м/с) и определяется, по-видимому, свойствами воды, упругостью и деформацией относительно коротких частей молекулярных цепей, поворотом отдельных групп макромолекул. Модуль упругости при высоких частотах имеет порядок $10^8 - 10^9$ Па, что обусловлено малой сжимаемостью воды, входящей в состав мышечной ткани. При уменьшении частоты наблюдается резкая дисперсия скорости звука, модуль упругости уменьшается на два - три порядка.

Это можно объяснить тем, что при низких частотах происходит релаксация высокомолекулярных цепей с относительно слабыми связями. При этом механическое воздействие на мышечную ткань разряжается через волну сдвиговой деформации.

Учитывая характер зависимости скорости звука и модуля от частоты, модели, характеризующие механические свойства мяса, можно представить следующим образом (рис. 4).

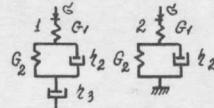


Рис. 4. Модели, характеризующие механические свойства мышечной ткани
Fig. 4. Models characterizing mechanical properties of muscle tissue

Модель 1 характеризует механические свойства мышечной ткани при больших амплитудах воздействия и частотах, близких к 0, модель 2 - при частотах $\omega \gg 0$. При воздействии на мышечную ткань переменным напряжением, подчиняющимся, например закону

$$\sigma = G_0 \cos(\omega t) \quad (7)$$

она испытывает деформацию, подчиняющуюся тому же закону, однако, частота деформации не совпадает по базе с частотой напряжения. На основе представлений об установленемся режиме в электрической цепи [4], содержащей активное сопротивление, емкость и источник переменной ЭДС с учетом уравнения (7) деформацию можно представить в виде

$$\epsilon = G_0 \left[\frac{1}{G_1} \cos(\omega t) + \frac{\sin(\omega t - \delta)}{\sqrt{\omega^2 G_1^2 + G_2^2}} + \frac{1}{\omega G_2} \sin(\omega t) \right] \quad (8)$$

где $\omega = \omega_1 \omega_2 / (\omega_1 + \omega_2)$; σ - напряжение; ω - частота; ω_1, ω_2 - модули упругости элементов модели I; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - коэффициенты вязкости элементов модели I.

Уравнение (8) представляет собой математическое описание деформации модели I. Первый член характеризует мгновенную деформацию в точности совпадающую с приложенным напряжением. Второй член характеризует эластичность третьей - пластичность. При $\omega \gg 0$ третий член в уравнении (8) становится малым. Поэтому при акустических исследованиях мяса течением можно пренебречь. Тогда уравнение (8) имеет вид (9)

$$\sigma = \sigma_0 \left[\frac{1}{\omega_1} \cos(\omega t) + \frac{\sin(\omega t - \delta)}{\sqrt{\omega^2 - \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2}} \right] \quad (9)$$

Уравнение (9) характеризует модель 2 (рис. 4).

Акустический метод был использован для оценки влияния условий замораживания на структурные изменения мышечной ткани. Рассмотрено изменение скорости распространения упругих волн в зависимости от конечной температуры замораживания. Показано, что кристаллообразование воды в мышечной ткани вызывает резкое увеличение скорости звука. При температуре ниже -30°C увеличение скорости почти прекращается. В целом характер изменения $c = f(\varepsilon)$ аналогичен характеру изменения вымороженной воды в мышечной ткани в зависимости от конечной температуры замораживания. Проведены акустические исследования мяса при охлаждении и хранении в охлажденном состоянии. Продухожильные мышцы выделяли из говядины полуутро через 1,5-2,0 часа после прекращения жизни животного, охлаждали при температуре 0°C и естественной циркуляции воздуха, а затем хранили при температуре 0°C . На рис. 5 представлены зависимости скорости звука в мышечной ткани от относительной деформации образцов, полученные в различные сроки хранения мяса.

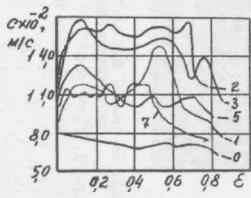


Рис. 5. Зависимости скорости звука от относительной деформации образцов мышечной ткани при хранении мяса в охлажденном состоянии (0, 1, 2, 3, 5, 7 - сутки хранения)

Fig. 5. Correlation of sound velocity and relative elasticity of muscle tissue patterns during cold storage of meat (0, 1, 2, 3, 5, 7 days of storage)

Зависимости $c = f(\varepsilon)$ имеют сложный характер. Для мяса, находящегося в парном состоянии, скорость распространения упругих волн в процессе сжатия образца от $\varepsilon = 0$ до $\varepsilon = 0,8$ изменяется сравнительно плавно и обясняется, по всей вероятности, малым значением модуля эластичности мышечной ткани. При окоченении

мяса происходит образование актомиозинового белкового комплекса с большой энергией связи. Характер зависимости $c = f(\varepsilon)$ меняется.

В процессе сжатия образца в начале скорость звука в нем возрастает, а затем наблюдается ее колебания на уровне значений большем, чем характерно для парного мяса. При дальнейшей деформации образца скорость звука в нем уменьшается. Это связано со сложным перемещением волокон, их деформацией, уплотнением клеточных оболочек, перегруппировкой высокомолекулярных цепей, миофibrил и их разрывами, вытеканием мышечной плазмы. Все эти изменения в парном мясе проявляются в меньшей степени, чем в мышечной ткани, находящейся в состоянии окоченения. При разрешении окоченения, ткань становится более эластичной и пластичной, а зависимость $c = f(\varepsilon)$ менее выраженной.

Вывод

Акустический метод может быть использован для исследования структурных изменений мяса в зависимости от условий холодильной обработки и хранения.

Литература

- Скучик Е. Основы акустики. М., Мир, 1976, 391 с.
- Берепечко И.И. Акустические методы контроля в технологии строительных материалов / В.В. Дзенис, В.Г. Васильев, И.Э. Зоммер и др. - Л., Строительство, 1978, 150 с.
- Ферри Д. Вязкоупругие свойства полимеров. И.Л., 1963, 520 с.