

МЕТОДЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЯСА

ГОЛОВКИН Н.А., ЕВЕЛЕВ С.А., СКОМОРОВСКАЯ И.Р.

Ленинградский технологический институт холодильной промышленности, Ленинград, СССР

Как известно, животная ткань представляет собой полимер биологической природы, специфика свойств которого определяется прежде всего большим числом гибких звеньев в макромолекулах, окруженных водой с растворенными в ней веществами. В последние годы большое распространение получила концепция, по которой основные физические свойства биополимеров зависят не только от их химического строения, но и от надмолекулярной организации /1, 2/. При этом полагают, что опережающее влияние на физические свойства животной ткани оказывает химическое строение, осуществляемое через физическую структуру. В этой связи все большее распространение получают физические исследования мяса.

Изменения, происходящие в мясе после прекращения жизни животного и применения технологической обработки, оказывают воздействие на его структуру, которая может меняться от вязкоупругого состояния со свойствами полупроводника в поликристаллическое - со свойствами диэлектрика. Это позволяет по механическим и электрическим свойствам судить об изменениях в мышечной ткани.

Наличие в биологической системе структур, обладающих множеством внутренних степеней свободы и оболочек клеток в различной степени разграничивающих ионопроводящую клеточную жидкость, вызывает при механическом и электрическом воздействии появление в тканях различных релаксационных процессов. Последнее выдвигает при использовании механических и электрических методов исследования особые требования. Рассматриваемые методы можно подразделить на методы с применением постоянных (квазистатических) и переменных полей, использование которых зависит от состояния мышечной ткани и задачи, стоящей при исследовании.

Методы с применением квазистатических полей позволяют изучать упругие, эластические, пластические мгновенные и пластические натекающие, релаксационные свойства - с одной стороны и поляризационные явления различной природы в комплексе - с другой. Использование квазистатических полей позволяет получать дискретную информацию преимущественно о надмолекулярной организации мышечной ткани в процессе технологической обработки и хранения.

С целью проведения дифференцированного анализа структурных изменений во времени представляется интерес применение переменных механических (акустических) и электрических полей. Исследование акустических свойств мяса может быть направлено на изучение изменения скорости упругих волн (скорости звука) C и затухания α , а также их частотных и температурных зависимостей. Эти исследования реализуются с применением волновых (импульсных и фазовых) и неволновых методов (схем с использованием автогенератора и резонансного усилителя).

При импульсном методе через определенные интервалы времени в продукте возбуждаются упругие волны, время прохождения и поглощение которых фиксируется соответственно с помощью измерителя интервалов времени и импульсного вольтметра (рис.1 А). Этот метод позволяет вести прямое определение скорости; одновременно изучать особенности распространения продольных и поперечных волн; при введении в схему измерения цифро-аналогового преобразователя в автоматическом режиме изучать механоструктурные изменения в мышечной ткани.

При фазовом методе акустические характеристики мяса определяются при непрерывном возбуждении упругих волн. При этом определяются амплитудно-фазовые характеристики: сдвиг фазы между волной, пришедшей на приемник, относительно излучаемого сигнала и амплитуда акустического сигнала (рис.1 Б). Этот метод не позволяет изучать изменение скорости в мясе в большом диапазоне значений, однако дает возможность проводить акустическую спектроскопию мышечной ткани на строго определенных частотах.

Неволновые методы с применением автогенератора и резонансного усилителя позволяют исследовать вязко-упругие свойства без установления скорости распространения упругих волн. Основным недостатком схемы с автогенератором является инерционность, второго - невысокая разрешающая способность на низких частотах /5/.

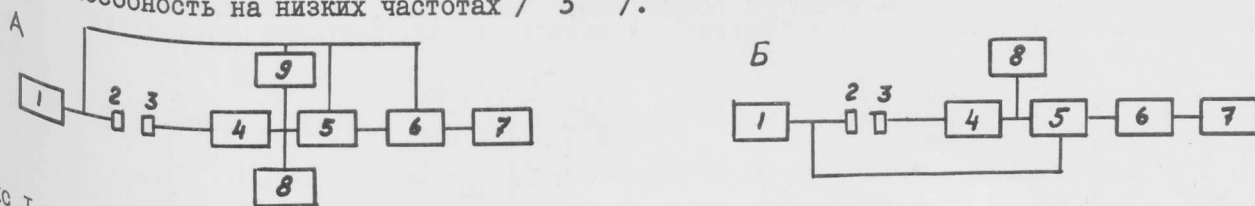


Рис.1 А - импульсная схема измерения: 1 - импульсный генератор; 2 - излучатель; 3 - приемник; 4 - селективный усилитель; 5 - измеритель интервалов времени; 6 - цифро-аналоговый преобразователь; 7 - двухкоординатный самописец; 8 - вольтметр. Б - фазовая схема измерения: 1 - генератор переменного тока; 2 - фазометр; 3 - приемник; 4 - усилитель переменного тока; 5 - фазометр; 6 - усилитель постоянного тока; 7 - двухкоординатный самописец; 8 - вольтметр.

На рис.2 представлены зависимости C и сжимаемости β от концентрации в водном растворе компонентов мяса NaCl (A1), KCl (A2), CaCl_2 (A3), MgCl_2 (A4), треонин (B1), лизин (B2), гистидин (B3), аргинин (B4), молочная кислота (B5); зависимость C от частоты возбуждения ω (B1); модуля E от частоты возбуждения (B2); зависимость C от влажности мяса φ (Г); зависимость C от температуры мяса t (Д).

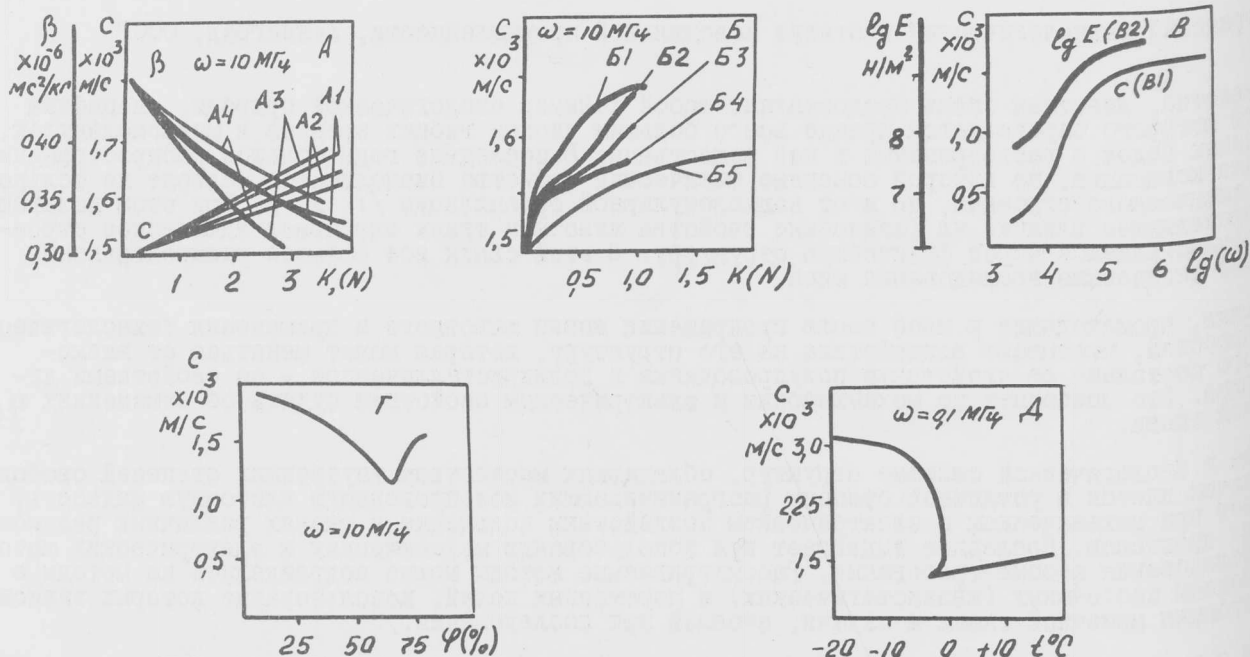


Рис. 2

Значение и характер изменений C и β от концентрации растворов свидетельствует о том, что существует четкая корреляция между акустическими характеристиками и химическим строением органических и неорганических соединений. Дисперсионные характеристики C и E для мяса, полученные на высоких частотах, характеризуют свойства воды с растворенными в ней веществами, определяются упругостью и деформацией низкомолекулярных фрагментов молекулярных цепей, поворотом отдельных атомных групп. Механическое воздействие на животную ткань при низких частотах разряжается через волну сдвиговой деформации. Отсюда высокомолекулярные цепи, составляющие основу мышечной ткани, участвуют в проведении упругих волн в основном на низких частотах. Если проанализировать температурную зависимость скорости в мясе, то можно сделать вывод о том, что ее ход в целом соответствует известным температурным зависимостям энтальпии (I), теплопроводности (λ), количеству вымороженной воды (ω). В общем виде эту связь можно представить в виде уравнений

$$I = B/C + A' \quad \lambda = C/B'' + A'' \quad \omega = C/B''' + A'''$$

где A и B – постоянные для данного вида мяса.

Представленные данные свидетельствуют о том, что акустические параметры на частотах до 10 кГц характеризуют преимущественно изменения в надмолекулярной структуре мяса – дисперсной фазе мышечной ткани, а на частотах более 100 кГц – изменения в дисперсионной среде.

Если заменить в первом приближении распределение времен релаксации мышечной ткани одним усредненным временем, механические характеристики ее можно представить в виде моделей, что видно из рис.3: А – модель тонкой структуры саркомера миофибрилл мышечной ткани по Хансону и Хаксли; Б – механическая модель, элементы которой идентифицированы с мышечными структурами – сухожилием (E_1), соединительной тканью (E_2), миофибриллярными фрагментами Н (E_3), а также силой трения при взаимодействии миофибрилл (F); В – комплексная модель, характеризующая пассивные механические свойства; Г – модель, характеризующая акустические свойства мышечной ткани.

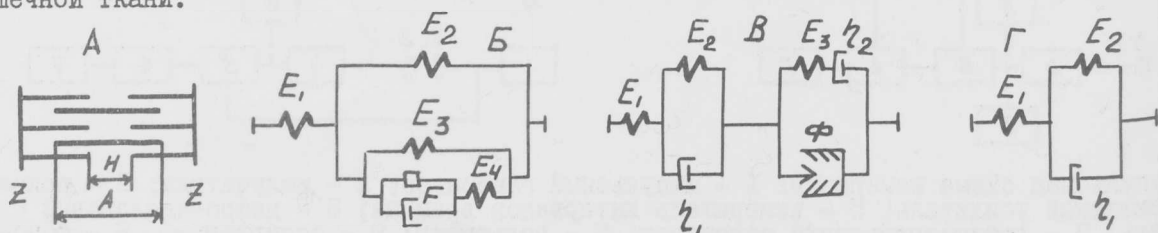


Рис.3

В отличие от акустических, электрофизические методы изучения изменений в мясе и мясopодук-тах применяют несколько десятков лет. В исследовательской практике нашли применение методы кондуктометрии и диэлектрометрии / 4 /, контактные и бесконтактные / 3 /, аналоговые и цифровые / 4 /. Наибольшее распространение получили аналоговые контактные. Несмотря на то, что методики применения этих методов постоянно совершенствуются, использование их сдер-живается отсутствием представлений об истинной эквивалентной схеме мышечной ткани. Как из-вестно, мостовые измерительные схемы содержат в компенсационном плече последовательно или параллельно соединенные активные и емкостные элементы. Однако, истинная электрическая экви-валентная схема мясной ткани значительно сложнее. Упрощенно ее можно представить в виде мо-дели А, а поляризационные явления различной физической природы смоделировать в виде электри-ческой аналогии Б (рис.4), где элементы 1, 2, 3, 4, 5, 6 моделируют различные виды поляри-зации мышечной ткани - электронную, ионную, дипольную, макроструктурную, поверхностную, электролитическую.

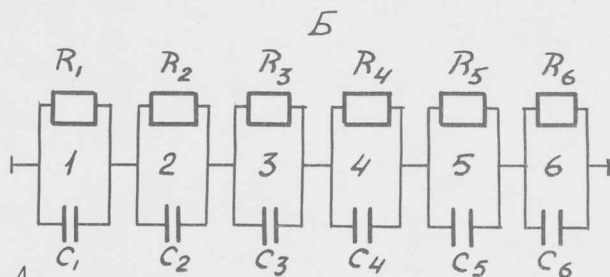
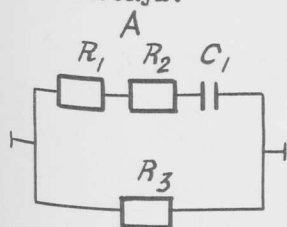


Рис.4

Ввиду сложности моделирования электрических явлений в мясе, представляет интерес применение импедансометрического метода исследования, не получившего распространение при изучении мы-шечной ткани. Импедансометрический метод позволяет определять истинный импеданс ткани без знания эквивалентной схемы. На рис.5 представлена блок-схема измерения импедансометрическо-го метода. Ячейка с образцом мясной ткани имеющая полное сопротивление Z_o , включена в цепь переменного тока. По изменению величин тока или падения напряжения на ячейке определя-ют величину изменений полного сопротивления или проводимости. На рис.5А представлена принци-пиальная схема измерений для хорошо проводящих тканей, а на рис.5Б - для плохо проводящих тканей. В замкнутой схеме, приведенной на рис.5Б, полное сопротивление ячейки с мясной тканью равно

$$Z_o = \frac{Z_v}{\frac{U_r}{U_o} - 1}$$

В связи с тем, что элемент сравнения Z_v является чисто активным частотно независимым, паде-ние напряжения будет обусловлено лишь свойствами объекта. При технологическом контроле сос-тояния мяса не обязательно знать абсолютные значения электрофизических характеристик. Для этой цели можно рекомендовать относительный параметр K_z - импедансный коэффициент частот-ной дисперсии, аналогичный принятому в биологии коэффициенту поляризации, но с заменой ак-тивного сопротивления на импеданс.

$$K_z = \frac{Z_{oH}}{Z_{oB}} = \frac{(U_r - U_{oB})U_{oH}}{(U_r - U_{oH})U_{oB}}$$

где Z_{oH} - полное сопротивление объекта на низкой частоте; Z_{oB} - полное сопротивление объ-екта на высокой частоте; U_{oH} - падение напряжения на низкой частоте; U_{oB} - падение нап-ряжения на высокой частоте.

Данный метод был применен при исследовании динамики электрофизических параметров при холо-дильной обработке и хранении мяса. На рис.6 представлена зависимость K_z в процессе хране-ния говядины, охлажденной в потоке воздуха. Представленные данные свидетельствуют о том, что динамика K_z отражает изменение структурных свойств мышечной ткани в результате посмерт-ных механо-химических процессов.

Импедансометрический метод представляет собой метод прямого отсчета и может быть использован для непрерывного контроля процессов, происходящих в мясе при технологической обработке и хранении.

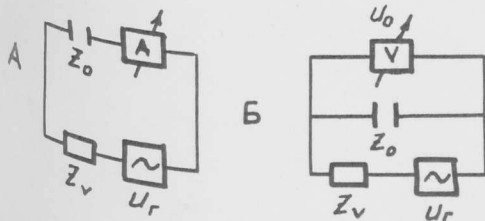


Рис.5

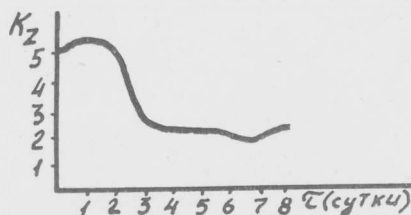


Рис.6

На основе теоретических, модельных и технологических акустических и электрофизических иссле-дований изготовлены и испытаны приборы, удобные для применения в научно-исследовательской практике для изучения протекающих структурных изменений мяса и на производстве для прогнози-рования и контроля качества мяса, типа "Биотест-1", "Биотест-2", "Биотест-2М", "Биотест-УНИДАТ".

1. Каргин В.А., Слонимский Г.Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. М., Химия, 1967, 231 с.
2. Рогов И.А., Горбатов А.В. Физические методы обработки пищевых продуктов. М., 1974, 582 с.
3. Усиков С.В. Электрометрия жидкостей. Л., Химия, 1974, 143 с.
4. Лопатин Б.А. Теоретические основы электрохимических методов анализа. М., 1975, 294 с.
5. Губанов Н.И. Медицинская биофизика. М., Медицина, 1977, 334 с.