

**Г.В. Дейниченко, Г.М. Постнов,
М.А. Чеканов, В.М. Червоний, Д.А. Нечипоренко**

**БЕЗВІДХОДНА ПЕРЕРОБКА М'ЯСА
З ВИСОКИМ ВМІСТОМ
СПОЛУЧНОЇ ТКАНИНИ
З ВИКОРИСТАННЯМ
УЛЬТРАЗВУКУ**

Монографія

Харків 2012

УДК 637.52.001.73

ББК 36.92-5

Б-39

Рекомендовано до друку Вченою радою Харківського державного університету харчування та торгівлі (протокол №9 від 31 травня 2012 року)

РЕЦЕНЗЕНТИ:

В.О. Сукманов, д-р техн. наук, проф., директор Інституту харчових виробництв, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін Донецького національного університету економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, академік Міжнародної академії екології та безпеки життєдіяльності;

Л.Г. Віннікова, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри м'яса та м'ясних продуктів Одеської національної академії харчових технологій, лауреат Державної премії України, Заслужений діяч науки і техніки України

В.М. Михайлов, д-р техн. наук, проф., проректор з наукової роботи Харківського державного університету харчування та торгівлі, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, відмінник освіти України

Безвідходна переробка м'яса з високим вмістом сполучної тканини з використанням ультразвуку [Текст]: монографія / Г.В. Дейниченко [та ін.]. – Харків, 2012. – 196 с.

ISBN

У монографії розглянуто питання безвідходної переробки м'яса з високим вмістом сполучної тканини з використанням ультразвуку. Науково обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність використання способу тендеризації м'яса з високим вмістом сполучної тканини за допомогою ультразвукових коливань. Видання призначене для використання в навчальному процесі підготовки магістрів та спеціалістів кваліфікації інженер-механік та інженер-технолог закладів ресторанного господарства та харчових виробництв.

Матеріал буде корисним аспірантам, науковим співробітникам, практичним працівникам, які займаються переробкою м'ясної сировини і зацікавлені у впровадженні сучасних енергоефективних технологій у харчопереробній промисловості, а також широкому колу читачів.

УДК 637.52.001.73

ББК 36.92-5

ISBN

© Дейниченко Г.В., Постнов Г.М., Чеканов М.А.,
Червоний В.М., Нечипоренко Д.А., 2012

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	5
Вступ	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ТА АПАРАТІВ ДЛЯ ТЕНДЕРИЗАЦІЇ М'ЯСА	9
1.1. Характеристики м'яса та м'ясопродуктів	9
1.2. Аналіз способів покращення якості м'ясної сировини	14
1.3. Аналіз апаратів для тендеризації м'ясної сировини	20
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ	24
2.1. Звукові та ультразвукові коливання	24
2.2. Модель, що описує плоску, однорідну звукову хвилю й швидкість звуку	25
2.3. Ультразвукова хвиля та її інформативні параметри	28
2.4. Енергія звукової хвилі	31
2.5. Сила та інтенсивність звуку	33
2.6. Тиск акустичного випромінювання	37
2.7. Проходження хвилі через межу розподілу двох середовищ	39
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ ДІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ НА М'ЯСО З ВИСОКИМ ВМІСТОМ СПОЛУЧНОЇ ТКАНИНИ	44
3.1. Вплив ультразвукових коливань на процеси масообміну та механізм дії на біологічні об'єкти	44
3.2. Розробка способу тендеризації за допомогою ультразвукових коливань м'яса з високим вмістом сполучної тканини	48
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	52
4.1. Обґрунтування та вибір частоти випромінювання	52
4.2. Дослідження робочих органів випромінювачів	69
4.3. Математичне моделювання процесу тендеризації за допомогою ультразвуку	71
РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕНДЕРИЗОВАНОГО М'ЯСА	76
5.1. Результати дослідження якісних показників тендеризованого м'яса	76
5.2. Результати гістологічних досліджень	94

РОЗДІЛ 6 РОЗРОБКА ПРОМИСЛОВОГО ЗРАЗКА АПАРАТА	112
6.1. Вимоги та обґрунтування конструкції апарата	112
6.2. Розрахунок магнітострикційної ультразвукової коливальної системи	113
6.3. Розрахунок і проектування трансформаторів пружних коливань і хвилеводів	117
6.4. Розрахунок і проектування робочої камери апарата	123
ДОДАТОК А Патенти	129
ДОДАТОК Б Програми з обробки експериментальних даних пакетом Mathcad	134
ДОДАТОК В Технічний опис та інструкція з експлуатації	141
ДОДАТОК Д Розрахунки та моделювання основних параметрів ультразвукової коливальної системи	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	180

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

УЗ – ультразвук;

УЗК – ультразвукові коливання;

УЗКВІ – ультразвукові коливання високої інтенсивності;

УЗКС – ультразвукова коливальна система;

ВВСТ – високий вміст сполучної тканини;

УЗТ – ультразвукові технології;

АТФ –аденозінтрифосфорна кислота, або аденозінтрифосфат;

ГАГ – глікозаміноглікани.

ВСТУП

Розвиток харчових виробництв неможливий без створення нових і вдосконалення існуючих технологій, створення нової продукції, надання традиційним продуктам нових властивостей. При всьому різноманітті існуючих на сьогоднішній день підходів найбільш ефективно вирішуються питання інтенсифікації технологічних процесів за рахунок використання нових видів енергії та високоєфективного підведення енергії до взаємодіючих речовин. Тому одним з перспективних напрямів створення нових і інтенсифікації існуючих процесів хімічних, мікробіологічних і харчових технологій є використання енергії ультразвукових коливань високої інтенсивності (УЗКВІ). Досвід застосування енергії ультразвукових коливань (УЗК) свідчить про позитивний вплив практично на всі відомі процеси хімічних, мікробіологічних і харчових технологій.

Унікальні переваги ультразвукових технологій (УЗТ) повинні були забезпечити їхнє найширше використання при створенні конкурентної продукції. Проте їх розвиток в останні десятиліття було припинено, а переваги повною мірою не реалізовані й дотепер. Основна причина полягає в тому, що розвиток УЗТ відбувався без урахування багатьох чинників, як об'єктивного так і суб'єктивного характеру. Фактично був відсутній комплексний підхід до проектування ультразвукового (УЗ) устаткування, що дозволяє враховувати вплив технологічних середовищ на роботу апаратів, забезпечувати оптимальний ультразвуковий вплив під час використання різних електронних генераторів і коливальних систем.

Перспективність використання УЗТ в харчовій та інших галузях промисловості спонукає необхідність подальшого розвитку й удосконалення апаратів для підвищення ефективності процесів харчових виробництв – збільшення продуктивності, зниження енергоспоживання, раціонального використання сировини, підвищення якості продукції.

Згідно з аналітичним звітом «Сільськогосподарський огляд 2009-2018», в основі якого лежать дослідження міжнародної Організації з економічного співробітництва і розвитку (OECD), Сільськогосподарської і продовольчої організації ООН (FAO), Міністерства сільського господарства США (USDA), а також Інституту з дослідження аграрної та продовольчої політики (FAPRI), світове споживання м'яса впродовж наступних 10 років поступово збільшуватиметься. В Україні, виходячи з даних офіційної статистики вирощування, виробництва і реалізації худоби і сільськогосподарської птиці за 10 місяців 2012 року, а також

імпорту м'яса і виробництва м'ясопродуктів, асоціація «Український клуб аграрного бізнесу» (УКАБ) прогнозує, що загальне виробництво м'яса в 2012 році в Україні збільшиться на 5% до 1 млн 625 тис. тонн (у забійній вазі) у порівнянні з роком раніше. Експерти УКАБ прогнозують що виробництво яловичини в Україні в 2012 році збільшиться на 15,6% до 385 тис. тонн (забійна вага, вихід м'яса 47%), тоді як в 2011 році даний показник складав 325 тис. тонн.

Одним з напрямів який дозволить збільшити відсоток використання м'язової частини сировини, є тендеризація м'яса з великим вмістом з'єднувальної тканини (ВВЗТ) за допомогою УЗК: лопаткової та тазостегнової частини. Удосконалення процесу тендеризації м'яса з ВВЗТ за допомогою УЗК, дозволить повніше використовувати ресурс сировини яловичої туші та скоротити тривалість технологічних процесів, які формують споживчі властивості м'ясопродуктів.

М'ясо є основним джерелом повноцінних білків тваринного походження, необхідних для підтримки здоров'я населення. За рахунок використання досягнень сучасної технології можна забезпечити високу якість та низьку собівартість м'ясопродуктів з м'яса яловичини з ВВЗТ, що дозволить розширити асортимент продуктів харчування підвищеного попиту та збільшити їх виробництво. У зв'язку із цим у м'ясопереробних підприємствах існує проблема поліпшення якісних характеристик вихідної сировини, тому що низька якість м'яса зумовлює невисокі споживчі властивості м'ясопродуктів.

Наукові праці вітчизняних і закордонних учених Ельпінера І.Є., Горбатова В.М., Рогова І.А., Заяса Ю.Ф., Хмелева В.М. присвячені питанню використання ультразвуку, заснованого на властивостях і специфічності дії ультразвукових коливань на біологічні об'єкти. Зокрема доведено, що в основі ультразвукової обробки м'яса лежить енергетичний вплив УЗК на клітинну структуру м'яса, за якого відбувається порушення цілісності як м'язових волокон, так і елементів з'єднувальної тканини. На теперішній час ультразвукові коливання в м'ясній промисловості використовуються для інтенсифікації процесів засолювання, витоплювання жиру та покращення якості м'ясопродуктів.

Перспективним напрямом розширення сировинної бази під час виробництва м'ясопродуктів є використання м'яса з ВВЗТ та його тендеризація за допомогою УЗК. Фізико-хімічні процеси, що відбуваються в сировині під час тендеризації, сприяють зміні її функціонально-технологічних властивостей, скороченню тривалості технологічних процесів під час виробництва м'ясопродуктів, підвищенню харчової цінності м'ясопродуктів, поліпшенню їх

засвоюваності та збільшення термінів зберігання. Тобто доцільність використання ультразвукової енергії під час переробки м'яса, на теперішній час, визначена досить чітко.

Можливі області використання енергії ультразвуку виявлені досить недавно, тому перехід від експериментальної перевірки результатів до широкого використання в м'ясній промисловості досі триває. Широке застосування ультразвуку у м'ясній промисловості стримується недостатньою кількістю наукових розробок у даній області, обмеженим вибором устаткування, високою специфічністю і необхідністю фундаментальних досліджень для визначення оптимальних умов протікання процесу, енергетичних параметрів процесу тендеризації, відсутністю реологічних та математичних моделей процесу тендеризації. Оскільки відомо, що відсутність або недостатність ефективної технічної бази робить безперспективною навіть найпривабливішу технологічну ідею, тому виникає питання про необхідність створення оригінальних апаратів, де обробка м'яса проводиться з урахуванням двох основних вимог, а саме:

- реалізуються необхідні часові та енергетичні режими обробки м'яса;

- продуктивність апарата задовольняє вимогам споживачів.

Таким чином, удосконалення процесу тендеризації м'яса з ВВЗТ за допомогою ультразвукових коливань є актуальним завданням.

Монографія виконувалась відповідно до основних напрямів наукових досліджень Харківського державного університету харчування та торгівлі за темою №10-03-06Б «Удосконалення процесів та обладнання для переробки харчової сировини на підприємствах харчування», №5-04-07Б (0104U002576) «Організаційні та технологічні аспекти безвідходної переробки сільськогосподарської сировини», №03-08-10Б (0107U010149) «Електрофізичні методи обробки сільськогосподарської сировини», №2-11ФБ (0108U001333) «Дослідження стану та структури вологи в харчових продуктах», № 3-11 БО (0111U001673) «Безвідходна переробка м'ясної сировини з використанням ультразвуку».

РОЗДІЛ I

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ТА АПАРАТІВ ДЛЯ ТЕНДЕРИЗАЦІЇ М'ЯСА

1.1. Характеристики м'яса та м'ясопродуктів

М'ясо й м'ясопродукти є найважливішими продуктами харчування, тому що в їхньому складі є майже всі необхідні для організму людини поживні речовини [1; 2]. Проте, цінність м'яса полягає, насамперед, у тому, що воно є основним джерелом повноцінних білків тваринного походження [3; 4].

Фізіологічна потреба в м'ясі й м'ясопродуктах для людини становить близько 75 кг на рік, у тому числі яловичини 20,3 кг [5; 6]. Отже, яловичина – це один із основних видів м'ясопродуктів, необхідних для задоволення потреб населення в повноцінному харчуванні.

М'ясо та м'ясопродукти – особлива група харчових продуктів, яка відрізняється специфічним хімічним складом та якісними показниками. Слід зазначити, що хімічний склад яловичини за всіма компонентами коливається в певних межах і залежить від віку тварин, їхньої статі, умов вирощування, складу кормів, способів забою і промислової обробки [7; 8]. У середньому яловичина містить 18,5...21,6% білка, 3...12% жиру, 0,3...0,9% вуглеводів [9; 10]. Аналіз наведених даних характеризує об'єкт досліджень, насамперед, як джерело білка. Літературі дані [11; 12] свідчать, що білки яловичини містять повний набір амінокислот, включаючи незамінні. Так, наприклад, білок яловичини містить 19 амінокислот, у тому числі 8 незамінних: валін, ізолейцин, лейцин, лізин, метіонін, треонін, триптофан, фенілаланін [13], що дозволяє зробити висновок про високу харчову й біологічну цінність м'яса яловичини.

Морфологічна будова яловичини також має свої характерні риси. Туша яловичини містить чотири основні види тканин: кісткову, м'язову, сполучну та жирову.

Основну частку з них займає м'язова тканина, яка складає 58...62% від маси туші. М'язова тканина має найбільше харчове значення. Вона складається з окремих тонких волокон довжиною до 12 см, які покриті тонкою напівпрозорою оболонкою (сарколемою) і з'єднані між собою сполучною тканиною (ендомізієм). Залежно від будови й характеру скорочення м'язів за життя тварини, м'язова тканина містить різну кількість сполучної тканини [14; 15].

Жирова тканина становить 3...14% маси туші й складається з жирових клітин, відокремлених одна від іншої прошарками м'якої сполучної тканини. Харчова цінність жирів зумовлена їх високою енергетичною

цінністю, вмістом жиророзчинних вітамінів і поліненасичених жирних кислот.

Сполучна тканина складає 9...14% від маси туші, за життя тварини виконує механічну функцію, вона зв'язує окремі тканини між собою та з кістяком, міститься в плівках, сухожиллях, суглобних зв'язках, окістях й хрящах. Її основу становлять волокна з колагену й еластину, які є фібрилярними білками. Колаген у звичайних умовах не розчиняється у воді, а під час нагрівання з водою переходить у глютин, який добре розчиняється у воді та добре засвоюється в організмі людини. Еластин дуже стійкий до нагрівання і не утворює глютину, тому харчова цінність його низька.

Екстрактивні речовини в м'ясі перебувають у вигляді азотистих і безазотистих сполучень і надають йому під час теплової обробки специфічного смаку і аромату.

Мінеральні речовини м'яса представлені солями кальцію, фосфору, заліза, натрію, цинку, міді, марганцю, алюмінію й ін. У м'ясі є ферменти, що сприяють його дозріванню, та вітаміни [16; 17].

Особливістю яловичини є підвищений вміст у ній м'язової й сполучної тканин, а також низька питома вага жирової тканини. Наприклад, у порівнянні зі свининою й бараниною яловичина містить на 6...10% більше м'язової тканини, на 2...4% більше сполучної тканини й на 2...30% менше жирової тканини [18; 19].

Яловича туша містить (у % до маси туші) у середньому 24% м'яса I сорту, 47% м'яса II сорту, 7% м'яса III сорту. У середньому яловичина I сорту містить 4...6 % сполучної тканини, м'яса II сорту містить 8...10 % сполучної тканини, яловичина III сорту містить 12...14 % сполучної тканини. Особливістю сполучної тканини яловичини є її висока гідротермічна стійкість, що і визначає особливі режими її технологічної обробки. Зокрема, під час переробки окремих частин туші яловичини з ВВСТ широко використовують процеси тендеризації для пом'якшення м'язової та сполучної тканини.

Розглянуті вище особливості хімічного складу, морфологічної структури м'язової та сполучної тканин у різних частинах туші тварин визначають фізико-хімічні (здатність утримувати вологу, показник рН) і структурно-механічні властивості м'яса, які, у свою чергу, зумовлюють якість кулінарних виробів після теплової обробки.

Здатність м'яса утримувати вологу визначається, в основному, здатністю утримувати вологу м'язовими та сполучними тканинами. У м'язових волокнах вода входить до складу міофібрил і саркоплазми, тому здатність м'язової тканини утримувати вологу залежить, у першу чергу, від властивостей і стану білкових міофібрил (актину, міозину, актоміозину).

Менше вологи утримується в сполучній тканині. Ця волога зв'язана, в основному, з колагеном. У складі м'яса є, так звана, вільна й зв'язана волога. Вільна волога становить 25...30% від загальної [20]. Вона служить розчинником мінеральних і інших водорозчинних речовин м'яса та може бути вилучена з нього виморожуванням, сушінням або пресуванням. До неї відносять капілярну вологу, що утримується в порах і капілярах м'яса. Капілярна волога впливає на соковитість м'яса, а міцність її зв'язку визначається величиною капілярного тиску, що залежить від величини розмірів капілярів. Чим менше розміри капілярів, тим більша величина капілярного тиску, тим сильніше утримується волога. Зв'язана волога (70...75% від загальної) м'яса входять до складу гідрофільних колоїдів-білків, які мають здатність взаємодіяти з молекулами води. До зв'язаної води відносять адсорбційну вологу, що являє собою сольватну оболонку білкових молекул, і яка утримується за рахунок сил адсорбції, а також частина капілярної вологи, яка утримується за рахунок сил адсорбції диполів води до стінок капілярів, осмотичну вологу, що утримується в незруйнованих клітинах за рахунок різниці осмотичного тиску з обох боків клітинних оболонок (напівнепроникних мембран) і внутрішньоклітинних мембран. Як у міжклітинних просторах, так і в тканинах із неклітинною структурою, роль напівнепроникних мембран виконує структура каркаса білкових гелів, структура яких утримує воду. Частина вологи утримується також чисто механічно в закритих порах м'яса. Слід зазначити, що висока якість м'ясного продукту (ніжність, соковитість) забезпечується за певного співвідношення в м'ясі вільної й зв'язаної вологи. Надлишок або нестача кожної з них може привести до зниження якості м'ясного продукту [21; 22].

Слід зазначити, що за вмістом загальної вологи, а також за співвідношенням вільної та зв'язаної вологи м'ясо різних частин туші яловичини незначно відрізняється. Тому, загальним напрямом підвищення якості м'ясних виробів може бути перерозподіл у них форм зв'язку вологи, здійснений за допомогою різних способів тендеризації. Відомо, що на консистенцію та якість м'яса і м'ясних продуктів найбільше впливає, так звана, слабозв'язана « корисна » волога, у яку в процесах тендеризації переводять більшу частину вільної й деяку частину зв'язаної вологи [23; 24].

Якість м'яса характеризують комплексом показників: сенсорними, санітарно-гігієнічними, технологічними, та харчовою цінністю. Чинники, які впливають на якість готових м'ясопродуктів, можуть бути об'єднані в 4 групи, такі як:

- прижиттєві – вид, порода, стать, вік, характер відгодівлі, стан здоров'я тварин, умови транспортування й передзабійна витримка;
- післязабійні – посмертне задубіння, дозрівання, глибокий автоліз,

гнильне розкладання, гідроліз і окисне псування жиру, пліснявіння, зміни кольору та інші процеси;

– технологічні процеси – соління, подрібнення, перемішування, смаження, варіння, коптіння, сушіння та ін., у результаті яких одержують продукт, готовий до споживання;

– умови зберігання м'яса та м'ясопродуктів – температура, відносна вологість, циркуляція повітря, термін зберігання та ін.

Якість і споживчі переваги м'яса та м'ясопродуктів зумовлені насамперед властивостями сировини, які повинні в максимальній мірі наближатися до властивостей, притаманним біологічним тканинам у живому організмі безпосередньо перед забоєм. Визначальне значення мають процеси виробництва, які змінюють властивості сировини [25; 26].

Механічні властивості м'яса залежать від його морфологічної структури і його хімічного складу. Із усіх харчових продуктів м'ясо має найбільш складну структуру. М'язова тканина свинини, яловичини, баранини містить більше 300 м'язів, різних за складом та будовою.

Якість м'яса оцінюється його ніжністю. Відомі фізичні методи оцінки ніжності м'яса, засновані, зокрема, на визначенні сили різання, граничного напруження зрізу, роботи різання, нормального граничного напруження зсуву, тангенційного граничного напруження зсуву, сили розкушування, тощо.

Звичайно визначають максимальну силу різання вздовж та поперек м'язових волокон. Під час розрізування зразки м'яса деформуються до моменту, коли прикладена сила переходить у напруження різання, а в момент перерізання – граничне напруження різання.

У зміні ніжності м'яса важливу роль відіграють кількість і стан компонентів сполучної тканини. У м'ясі в стані задубіння білки сполучної тканини (колаген, еластин) і основна речовина стають менш лабільними в порівнянні з їхнім станом відразу після забою. Лабільність компонентів сполучної тканини збільшується в період дозрівання м'яса, коли з лізісом вивільнюються гідролітичні ферменти. Це в значній мірі визначає гідротермічну стійкість колагену: чим більше лабільна основна речовина, тим легше розварюється колаген.

Зниження величини структурно-механічних показників для м'ясних виробів з натуральної м'язової тканини позитивно впливає на їхню консистенцію (вироби виходять більш ніжні й соковиті). Існує тісна кореляційна залежність між морфологічною структурою м'язової й сполучної тканин м'яса, ступенем руйнування її структури в процесі тендеризації та показниками структурно-механічних властивостей.

Були проведені дослідження з метою з'ясування залежності

ніжності майже всіх м'язів яловичої туші від вмісту в них волокон колагенової і еластинової сполучної тканини [27; 28].

Ніжність м'яса залежить від багатьох чинників прижиттєвого характеру й передається у тварин генетично. Насамперед ніжність м'яса визначається структурою м'язової тканини: при збільшенні діаметра м'язових волокон ніжність зменшується. Кількісний вміст колагенової сполучної тканини – один з вирішальних чинників. Якісний стан колагенової сполучної тканини залежить від ступеня полімеризації основної речовини (полісахарид-білкового комплексу). Від нього залежить здатність колагену розварюватися, в тому або іншому ступені обробці жорсткого м'яса. Саме тому для збільшення ніжності жорсткого м'яса з великим вмістом сполучної тканини використовують процеси тендеризації м'ясної сировини.

Багатьма дослідниками вважалося, що сполучна тканина м'яса має низьку біологічну цінність, тому що не містить деяких незамінних амінокислот [29; 30]. Але, як свідчать нові дослідження, було встановлено, що збільшення до певної міри частки білків сполучної тканини у м'ясопродуктах не призводить до зниження їхньої біологічної цінності [31]. Більше того, клінічні спостереження показали, що збільшення в яловичині частки білків сполучної тканин (гідролізованого колагену) призведе до підвищення біологічної цінності м'ясопродуктів. У цей час проведені дослідження, в яких встановлено, що підвищення вмісту в м'ясі колагену до 15% від загальної маси м'ясних білків призводить до збільшення збалансованості сумарного амінокислотного складу білків м'яса стосовно білка-еталона [32; 33]. Тому не можна однозначно стверджувати, що харчова й біологічна цінність яловичого м'яса, що містить підвищену кількість сполучної тканини (наприклад, лопаткова й тазостегнова частини туші, у яких вміст колагену й еластину досягає 9...12%), поступається іншим частинам туші.

Проте, для того, щоб збільшити до максимуму біологічну цінність м'яса з великим вмістом сполучної тканини, необхідно білки сполучної тканини перевести в стан, що забезпечує їхній швидкий гідроліз в організмі людини шляхом використання різних способів тендеризації для покращення консистенції м'яса [34; 35]. Для цього потрібно проаналізувати способи покращення консистенції м'ясної сировини, з метою виявлення раціональнішого способу.

Із вище наведеного можна зробити висновок, що м'ясо та м'ясопродукти – особлива група харчових продуктів, що відрізняється специфічним хімічним складом та якісними показниками та є найважливішими продуктами харчування, оскільки містить майже всі необхідні для організму людини поживні речовини та є основним джерелом

повноцінних білків тваринного походження, тому надзвичайно важливо під час переробки використовувати його раціонально. Якість м'ясної сировини з ВВСТ підвищують за допомогою різних способів тендеризації. Тому необхідно проаналізувати способи покращення якості м'ясної сировини.

1.2. Аналіз способів покращення якості м'ясної сировини

М'ясо – це дорога сировина, тому повне його використання надзвичайно важливе під час його переробки. Велика кількість технологічних процесів впливають на мікробіологічний стан м'яса і його харчову цінність, оскільки створюються сприятливі умови для розвитку мікрофлори, ферментативних і неферментативних реакцій, що викликають небажані зміни. Обробка за високих температур викликає термічну деградацію низки компонентів і накопичення небажаних речовин. Вибір процесів переробки сировини та їх параметрів повинен бути таким, щоб виключити вказані негативні зміни і забезпечити високу якість готових продуктів.

Сукупність дій, направлена на продукт з метою покращення його консистенції називається тендеризацією. На м'ясопереробних підприємствах традиційно використовують чотири основних способи тендеризації (рис. 1.1).

Підвищення ніжності як парної, так і охолодженої сировини може бути досягнуте за рахунок її механічної обробки різного ступеня інтенсивності. Ефективність цих способів залежить від вибору пристроїв, режимів обробки, стану і структури сировини. М'ясо з м'якою консистенцією краще обробляти в масажерах, м'ясо з жорсткою консистенцією (яловичина, баранина) – в тумблерах, тому що поверхнева тендеризація дає незначний технологічний ефект [36; 37].

Для інтенсифікації процесів розподілу розсолу і дозрівання м'яса застосовують механічну тендеризацію м'яса, тумблірування і масажування. Механічна тендеризація і тумблірування, як правило, використовуються для обробки низькосортної сировини, масажування – для м'яса з переважаючим вмістом м'язової тканини.

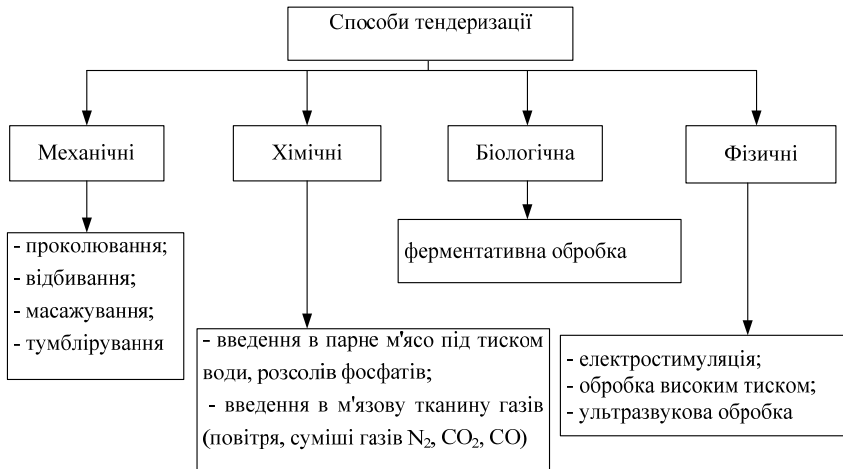


Рис. 1.1. Класифікація способів тендеризації м'ясної сировини

Механічна тендеризація – це спосіб розм'якшення тканин м'яса шляхом наколювання або відбивання сировини. Часткове руйнування і пом'якшення тканинних структур дає можливість поліпшити консистенцію, соковитість, збільшити проникність речовин соління і прискорити ферментативні процеси. На виробництві частіше за все проводять механічну тендеризацію яловичини, яку в подальшому використовують для виготовлення реструктурованих продуктів [38; 39].

Найбільш ефективним є поєднання механічної тендеризації (проколювання) з тумбліруванням або масажуванням. Ці види механічної обробки сировини засновані на принципі використання енергії падіння шматків м'яса з деякої висоти, удару їх один об другий, об виступи і стінки апарата. При цьому сировина піддається інтенсивним механічним деформаціям, що призводять до підвищення тиску в місці контакту. Стиснення і розширення м'язової тканини, що супроводжується виникненням зміною внутрішнього напруження, забезпечує інтенсивний фільтраційний перерозподіл розсолу системою пор та капілярів всередину м'яса.

Ефект масопереносу під час тумблірування та масажування додатково посилюється у зв'язку з появою мікророзривів тканини і підвищенням її проникності. Тривалість тумблірування залежить від розмірів шматків, виду, стану і властивостей сировини, типу пристроїв,

попередньої обробки. Проте механічна обробка тривалістю більш ніж 16...24 годин, погіршує органолептичні показники і знижує вихід в результаті деструкції м'яса.

Масажування – це різновид інтенсивного перемішування. Масажер складається з ємності, що оснащена лопатями, які обертаються, або шнеками. У масажерах відсутні ударні дії, тому обробка сировини менш інтенсивна, ніж у тумблерах, тривалість масажування значно більша.

На виробництві розсіл вводять в сировину не лише під час шприцювання, але і частково в масажер або тумблер. Обробку в цих апаратах виконують безперервно або циклічно. У період механічних дій відбувається фільтраційно-дифузійне перенесення, в період спокою – дифузійне. Вибір параметрів механічної обробки для кожного виду продукту здійснюється індивідуально, виходячи з виду сировини і типу устаткування, яке має в своєму розпорядженні підприємство [40; 41].

Хімічні способи засновані на введенні у м'ясо під тиском різних рідких і газоподібних компонентів. Шприцювання парного м'яса водою, розсолем з концентрацією хлориду натрію, який відповідає ізотонічному розчину (0,9 % NaCl), а також водних розчинів триполіфосфатів та їх сумішей із хлоридом натрію, істотно поліпшує ніжність м'яса і його здатність зв'язувати вологу. Механізм їхнього впливу полягає в руйнуванні іонами натрію й хлору актоміозинового комплексу. При цьому відбувається гідратація актину й міозину, їхнє набрякання, що позитивно впливає на зниження твердості м'язів. Застосування розчинів хлористого натрію, а також розчинів інших солей у гіпертонічній концентрації викликає складні перерозподіли води в межах клітин, пучків м'язових волокон і дає видимий ефект покращення консистенції м'яса [42; 43].

Введення у м'язову тканину газів, повітря та води під тиском $(1,8...2,2) \cdot 10^5$ Па дозволяє поліпшити консистенцію внаслідок пом'якшення структури. Найкращі результати дає застосування суміші газів: 85 % N₂, 12 % CO₂, 1...3% CO. Введення води під тиском у тушу тварин до їхнього посмертного задубіння підвищує ніжність м'яса на 20% [44; 45]. Ефект тендеризації під час використання води зумовлений фізико-хімічним впливом її на м'язову тканину. Під час введення води активізуються природні протеолітичні ферменти м'яса, відбувається порушення цілісності сполучних тканин, розшарування м'язових волокон. Для введення різних розчинів у туші тварин використовують кілька способів: ін'єкція, що вводиться перед забоем тварини в кровоносну систему, шприцювання до й після посмертного задубіння, обробка м'яса в розчинах із використанням механічних способів, що прискорюють процеси масообміну [46; 47].

Сутність біологічного способу полягає в застосуванні

протеолітичних ферментів для обробки м'ясної сировини. В результаті ферментативного гідролізу білків розм'якшується структура м'язових волокон, що забезпечує підвищення ніжності м'яса, поліпшення органолептичних показників і підвищення виходу готової продукції. Ефективність використання ферментів визначається їх каталітичною активністю, специфічністю дії, оптимумом рН і термостабільністю.

Ферменти повинні, в першу чергу, викликати зміни в сполучній тканині— розщеплювати мукополісахаридний комплекс, сприяючи зменшенню стійкості сполучної тканини до нагріву, стимулювати гідроліз колагену і еластину; слабко діяти на м'язову тканину; мати якомога вищий температурний оптимум дії, зберігаючи здатність частково змінювати тканини під час теплової обробки; діяти в слабкислому або нейтральному середовищі з максимальною активністю; бути нешкідливими для людини [48; 49].

У промисловості для пом'якшення м'яса з великим вмістом сполучної тканини використовують папаїн, панкреатин і рениномейн Г10Х, яким притаманна висока колагеназна і еластазна активність. Ферментні препарати застосовуються, переважно, для збільшення ніжності яловичого м'яса. М'язи великої рогатої худоби мають порівняно низьку концентрацію тканинних протеолітичних ферментів – катепсинів. Крім того, частина відрубу має підвищений вміст сполучної тканини, що зумовлює жорсткість м'яса і його повільне дозрівання.

Важливою умовою ефективности застосування ферментів є спосіб обробки м'яса ферментними препаратами, який повинен забезпечувати їх рівномірний розподіл в оброблюваному об'єкті і гарний контакт з прошарками внутрішньо- м'язової сполучної тканини [50, 51].

Найбільшого поширення біологічні способи тендеризації м'яса набули для обробки м'яса під час виробництва напівфабрикатів із низькосортної сировини, призначеної для вироблення варених ковбас та реструктурованих виробів. Реструктурування дозволяє регулювати органолептичні властивості і структуру, використовувати нетрадиційну сировину, розширити асортимент м'ясопродуктів, підвищити вихід м'ясопродуктів, підвищити рентабельність [52; 53].

До фізичних способів тендеризації м'ясної сировини відносять електростимуляцію, обробку високим тиском та обробку ультразвуком. Електростимуляція туш безпосередньо після забою дозволяє не лише зменшити тривалість автолізу, але і дає ефект підвищення ніжності м'яса.

Активне скорочення м'язів під дією імпульсів електричного струму викликає фізичну деструкцію м'язових волокон і розривання зшивок колагену, сприяє прискоренню процесу природного дозрівання м'яса й

підвищенню його ніжності за рахунок складного перерозподілу іонів кальцію, розщеплення й відновлення АТФ, розпаду глікогену, утворенню молочної кислоти, зсуву показника рН, активації ферментів. Установлено, що обробка м'яса імпульсами струму різної частоти сприяє інтенсивному перерозподілу в ньому вологи. Зазначений ефект використовується під час соління м'яса. Електростимуляцію здійснюють шляхом накладання електродів на різні частини туші і подачі змінного струму напругою від 40 до 2000 В імпульсами, тривалість яких складає 0,4 с з інтервалами між ними 0,6 с.

Обробка м'яса високим тиском (140...150 МПа) викликає розпад актоміозинового комплексу на актин і міозин за механізмом, аналогічним із процесом розм'якшення посмертного задубіння, що забезпечує підвищення ніжності м'яса. J. L. Shank [54; 55] розробив спосіб інгібування бактеріального зростання в свіжому м'ясі. Бажаних результатів досягають обробкою м'яса «in situ» газовою атмосферою – вуглекислого газу або кисню – за надатмосферного тиску. Обробка м'яса вуглекислим газом під тиском ефективно інгібує бактеріальне зростання внаслідок утворення вугільної кислоти, яка знижує рН м'яса.

М'ясо подрібнюють або нарізують на кубики або шматочки завтовшки 0,3...5 см (оптимальні 0,9...2,5 см), поміщають в барокамеру, куди вводять достатню кількість CO₂ або кисню, і доводять тиск з 5,2·10⁵ до 84·10⁵ Па. М'ясо витримують в газовій атмосфері протягом 0,5...72 годин, після чого у ньому не виявляється активних ферментів.

J. L. Shank рекомендує варіант обробки, за якого тиск газу дорівнює 14·10⁵...84·10⁵ Па, а тривалість витримки 2...8 годин. Чим нижче тиск, тим вище тривалість обробки, і навпаки. Було встановлено, що можна значно скоротити час обробки і знищити всі бактерії, присутні в м'ясі, якщо обробку під тиском комбінувати з консервуванням, причому консервування проводять, поки м'ясо знаходиться в барокамері. Під час обробки знищуються всі вегетативні форми бактерій і бактерійні спори. Крім того, значно скорочуються виробничі витрати, оскільки спеціальна витримка в барокамері непотрібна. Ще одна перевага даного процесу полягає в тому, що набагато знижується інтенсивність подальшої стерилізації, якій часто піддають м'ясо [56].

Дія на м'ясо ультразвукової вібрації (частотою більшою 15 кГц протягом 1...30 хв) призводить до порушення цілісності м'язових волокон і елементів сполучної тканини. Сутність процесу тендеризації м'яса за допомогою УЗК полягає в застосуванні ультразвукових коливань з метою руйнування сполучних тканин м'яса, внаслідок чого збільшується його ніжність незалежно від процесу дозрівання м'яса, від його вигляду або умов

обробки. Можна застосовувати ультразвукові коливання за межами звукових частот від 15 кГц [57; 58].

У цьому діапазоні використовуються ультразвукові коливання частотою 200...900 кГц, але, з погляду економіки виробництва і глибини проникнення енергії у м'ясо, рекомендується використовувати ультразвукові хвилі нижньої частини ультразвукового діапазону від 20 до 200 кГц. Вибір частоти ультразвукової хвилі залежить від робочої частоти або діапазону частот генератора та встановлюється залежно від його призначення. Для УЗ генераторів промислового використання виділені наступні частоти: $18 \pm 4,35$ кГц; $22 \pm 2,65$ кГц; $44 \pm 6,4$ кГц і $66 \pm 8,6$ кГц [59; 60]. Попередніми дослідниками [61] було встановлено, що під час застосування ультразвукових хвиль для обробки м'яса, вони пройдуть, в якійсь мірі, через уся масу м'яса, але більша кількість енергії буде поглинута сполучною тканиною, оскільки сполучна тканина характеризується вищим поглинанням і швидкістю звуку, ніж м'які або жирові тканини. Проходження ультразвукових хвиль крізь м'ясо викликає швидко зміну акустичного тиску, відстань між піками якого обернено пропорційна частоті хвиль. Під час дії на м'ясо впливають ультразвукові хвилі достатньої потужності, щоб проникнути в м'ясо, і достатньої амплітуди, щоб викликати розпад сполучної тканини, крізь яку ці хвилі проходять, розм'якшення парного, замороженого і незамороженого, сирого м'яса або термообробленого можна здійснити за дуже короткий час під час охолодження, або без охолодження в контрольованих і неконтрольованих атмосферних умовах [62; 63].

На виробництві традиційно не відокремлюють технологічні процеси переробки м'ясної сировини, оскільки вважається що поєднання кількох процесів у єдиний спосіб дозволяє використовувати переваги цих процесів та компенсувати їх недоліки, що, в свою чергу, інтенсифікує переробку м'ясної сировини.

Технологія переробки продуктів зі свинини, яловичини і баранини включає низку загальних операцій, які направлені на консервацію сировини і формування необхідних органолептичних властивостей: підготовку і обробку сировини, соління, підготовку сировини до термічної обробки, термічну обробку, пакування та зберігання готових продуктів.

М'ясопродукти є, по суті, виробами різних способів соління. До них відносяться вироби зі свинини, яловичини і баранини, які ще називають солоними виробами, копченими виробами, а також шинкою і делікатесними виробами.

Якість солоних виробів залежить від складу, стану і властивостей

використаної сировини, характеристики якої суворо регламентуються технічними вимогами [64; 65].

У промисловій практиці користуються трьома класичними способами соління: сухим, мокрим і змішаним, а також їх різними модифікаціями. В основі більшості варіантів соління лежить шприцювання розсоллом.

Основними недоліками вказаних класичних технологій є тривалість і трудомісткість процесу, тому вони використовуються обмежено, переважно для соління сирокочених виробів великих розмірів (окосту, бекону та ін.). У даний час, в основному, застосовують інтенсивні методи соління, що дозволяють істотно скоротити виробничий цикл.

Поява нових, досконаліших технічних пристроїв та апаратів для інтенсифікації переробки м'яса призводить до зміни класичних технологій, а також сприяє розширенню асортименту м'ясної продукції, вказує нові шляхи тендеризації м'ясної сировини.

Одним із нових комбінованих способів тендеризації є тендеризація за допомогою УЗК в проміжному середовищі [73], але за цим процесом недостатньо даних, тому виникла необхідність у додаткових дослідженнях.

1.3. Аналіз апаратів для тендеризації м'ясної сировини

Основним напрямом підвищення ефективності та розширення використання м'ясної сировини є інтенсифікація процесів її тендеризації, що здійснюється за наступними основними напрямками:

- розробка раціональних режимів тендеризації, зумовлених способом тендеризації, природою матеріалу та вимогами до кінцевого продукту;
- інтенсифікація процесів тендеризації шляхом комбінованого підведення до сировини, що пом'якшується, декількох видів енергії;
- комбінування декількох способів тендеризації в одному процесі пом'якшення з метою одержання високоякісного продукту та максимальної ефективності процесу.

Останнім часом на виробництві найпоширенішими є апарати які використовують комбіновані способи тендеризації та соління одночасно. У якості прикладу можна навести вакуум-масажери. Застосування вакууму (до 50 кПа) збільшує ефективність механічної обробки сировини. Механізм дії вакууму полягає в розтягуванні і потонненні стінок клітин, розширенні пор і капілярів, видаленні повітряних бульбашок, що в сукупності забезпечує краще проникнення речовин соління у м'ясо.

Однією з переваг вакуумної обробки є поліпшення кольору, смаку,

аромату, консистенції в результаті виключення контакту кисню з продуктом. Крім того, застосування вакууму знижує кількість бактерій на поверхні готового продукту, зменшує втрати цінних речовин і підвищує вихід готового продукту. Особливо ефективним є застосування вакуумування під час обробки яловичини.

Окоти обробляють у тумблерах за частоти обертання 8 об/хв. за режимом: 10...20 хв обертання, одноразова зупинка на 50 хв. Безкісткову сировину обробляють за режимом: 20...30 хв обертання, 45...60 хв – зупинка; цикл повторюється 24...36 годин. Загальна тривалість активної фази механічної обробки повинна складати 300...500 хв; кількість ударних дій робочого органу апарату на сировині за весь період соління повинна бути не менше 3000 для свинини і 6000 для яловичини; загальна тривалість соління свинини (за інших рівних умов) на 25...33 % менше, ніж для яловичини.

На даний час існують пристрої (фірма H.J. Lahgren, Голландія), що поєднують вакуум-масажування з підшприцьовуванням шматків м'яса і голковою тендеризацією. Сутність способу полягає в наступному – сировина, що знаходиться у вакуум-апараті масажера, падає з певної висоти на голки і у цей момент в шматок м'яса нагнітається точно дозована кількість розсолу. Використання цього пристрою дозволяє використовувати низькосортну сировину з великим вмістом сполучної тканини під час виробництва ковбас та реструктурованих виробів.

Відома дослідно-промислова установка (рис. 1.2), для ультразвукової обробки замороженого м'яса [66]. За даними авторів, під час проведення всіх досліджень, обробці ультразвуком піддавали м'ясо охолоджене після двох діб витримки; м'ясо заморожене з температурою усередині м'язів – 5... – 8°C; м'ясо заморожене з температурою усередині мінус 30°C. У дно ванни 1 вмонтований магнітострикційний вібратор 2. Продукт 3 розміщували на вібраторі і для створення щільного контакту між оброблюваним зразком м'яса й поверхнею випромінювача продукт притискали вантажем. Живлення магнітострикційного вібратора здійснювалося від генератора 11 марки УЗГ - 10 М. Для запобігання

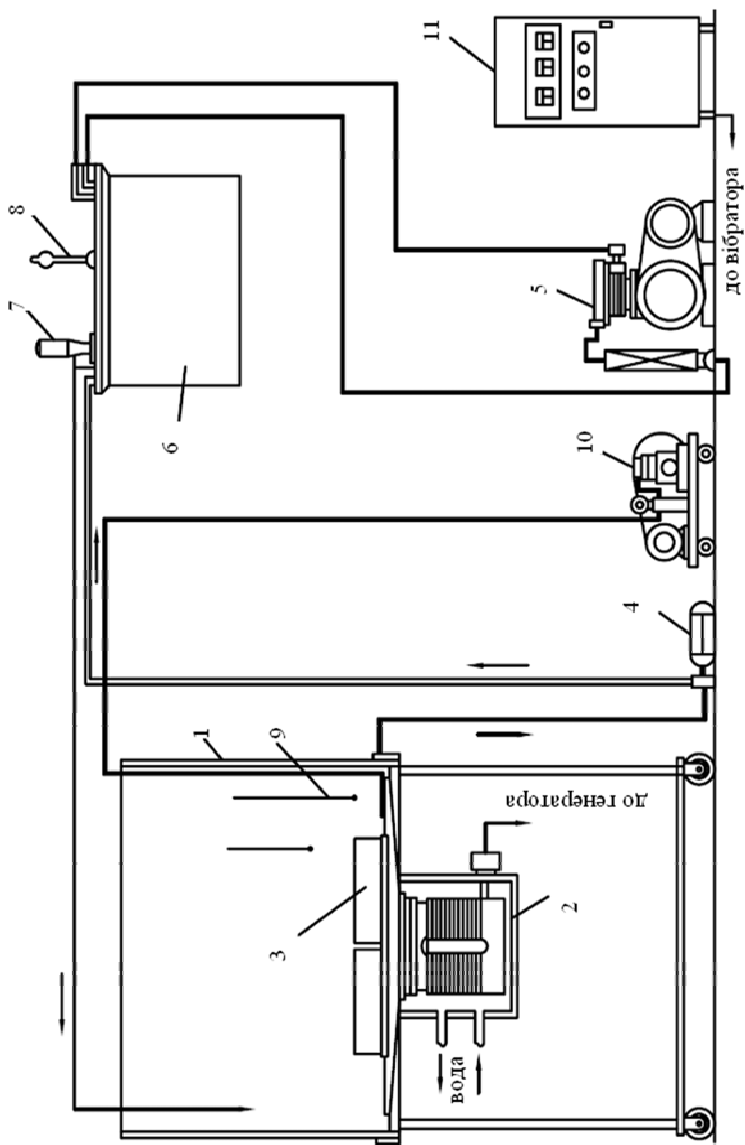


Рис. 1.2. Установа для обробки м'яса ультразвуком: 1 – ванна; 2 – магніострикційний вібратор; 3 – продукт; 4 – насос; 5 – компресор; 6 – термостат; 7 – мішалка; 8 – термометр; 9 – термометр; 10 – генератор; 11 – компресор; 11 – генератор УЗ.

надмірного перегріву й дефростації під час обробки замороженого продукту була використана схема охолодження розсолу, що складається з термостата 6 з мішалкою 7 і контрольним термометром 8, компресора 5 марки ФАК 1,5, насоса 4, ультразвукової ванни 1 і з'єднуючих трубопроводів. Барботування розсолу здійснювалося к ванну, в якій проводили обробку зразків м'яса ультразвуком. Зразки м'яса правильної форми вагою 150...200 грамів поміщали на дно ванни над вібратором, ванна заповнювалася середовищем, що передає ультразвукові коливання. Температуру середовища й оброблюваних зразків вимірювали за допомогою термопар 9 та повітряного компресора 10. В ультразвукову ванну заливали розчин кухонної солі концентрацією від 5 до 25 %. З ванни розсіл за допомогою насоса 4 подавався в термостат зі змішувачем, по якому циркулював фреон 12. У термостаті відбувалося охолодження розсолу. Охолоджений розсіл температурою $-8...-12^{\circ}\text{C}$ подавався сифоном в ультразвукову ванну.

Обробка ультразвуком м'яса з метою покращення його консистенції дозволяє отримати продукт більш високої ніжності. Впровадження ультразвукових пристроїв для пом'якшення м'яса з ВВСТ дозволило більш ефективно використовувати м'ясну тушу для виробництва натуральних напівфабрикатів, у зв'язку з цим вивільнилися в камерах дозрівання м'яса значні площі.

З вище сказаного можна зробити висновок, що на фоні існуючих способів тендеризації вигідно виділяється високоінтенсивний спосіб тендеризації м'яса за допомогою УЗК, який характеризується високою якістю отриманого продукту та низькими енерговитратами.

Використання даного способу під час переробки м'ясної сировини є перспективним, оскільки дозволяє істотно скоротити тривалість процесу дозрівання. Власними дослідженнями способів покращення консистенції м'ясної сировини встановлено, що для інтенсифікації технологічних процесів тендеризації м'ясної сировини використовують нові види енергії та умови її вискоєфективного підведення до взаємодіючих речовин. Аналіз науково-технічної літератури, комплексні патентні дослідження дозволили зробити висновок про перспективність використання апаратів для тендеризації м'яса за допомогою ультразвуку

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ

2.1. Звукові та ультразвукові коливання

Для обґрунтування способу тендеризації м'яса та м'ясопродуктів за допомогою ультразвуку та розрахунків апарату для його реалізації необхідно провести теоретичні та аналітичні дослідження поширення УЗК в різних середовищах, у тому числі в м'ясі та м'ясопродуктах.

Звукові та ультразвукові коливання – це поздовжні до напрямку поширення пружні коливання матеріальних часток. Це означає, що звук і ультразвук може виникати й поширюватися лише в матеріальних середовищах, у вакуумі ні звук, ні ультразвук існувати не можуть [67].

Під ультразвуковими коливаннями мають на увазі такі коливання, частота яких лежить за верхньою межею чутливості людського вуха, тобто перевершує приблизно 20 кГц. Звукові коливання, які за частотою перевищують цю величину, відносять до ультразвукових, тобто діапазон ультразвукових коливань перевищує 16 октав. У перерахунку на довжину хвиль це означає, що ультразвукові хвилі займають широкий діапазон, який перебуває у таких межах:

– у повітрі (швидкість поширення звуку $c \approx 330$ м/с, а довжини хвиль відповідно від $\lambda \approx 1,6$ до $\lambda \approx 0,3 \cdot 10^{-4}$ см);

– у рідинах (швидкість поширення звуку приблизно $c \approx 1200$ м/с, а довжини хвиль від $\lambda \approx 6$ до $\lambda \approx 1,2 \cdot 10^{-4}$ см);

– у твердих тілах (швидкість поширення звуку $c \approx 4000$ м/с, а довжина хвилі, з огляду на частотний діапазон в 16 октав, від $\lambda \approx 20$ до $\lambda \approx 4 \cdot 10^{-4}$ см).

Саме невелика довжина ультразвукових хвиль і зумовлює їхнє застосування у всіх областях техніки, технології, медицини.

Крім поздовжніх хвиль, що поширюються в матеріальних середовищах, через неоднорідність середовища відбиті хвилі можуть поширюватися й у площині, перпендикулярній до початкового напрямку – це поперечні хвилі.

На поверхні розподілу двох матеріальних середовищ можуть виникати й поширюватися ультразвукові хвилі, пов'язані з обома середовищами – це поверхневі хвилі. Проте у всіх видах ультразвукових коливань напрямок перенесенню ультразвукової енергії збігається з напрямком, у якому коливаються матеріальні частки середовища або матеріалу. Крім того, за деяких умов можливі резонансні явища, а також

явища додавання й віднімання (компенсації) коливань, що дозволяють проводити аналогії акустичного поля з електромагнітним полем.

За свідченнями літературних джерел [68], аналізувати й аналітично описати звукове поле досить складно. Основні закони ультразвуку отримані в результаті дослідження однієї поздовжньої хвилі, але вони, як вхідні, застосовуються й для аналізу складних акустичних полів.

Закони акустики слухового діапазону діють без зміни в області ультразвуку. Проте спостерігаються деякі особливі явища, що не мають місця в чутному діапазоні, і зумовлені дуже малими довжинами хвиль ультразвукового діапазону. Порівняно простими технічними засобами можна одержати ультразвукові коливання великої інтенсивності, які важко одержати в акустичному діапазоні. Це дозволяє застосовувати ультразвук у різних технологічних процесах у якості своєрідного й ефективного інструмента наприклад під час обробки виробів, а також при змішуванні, або розподілі матеріалів, та інтенсифікації процесів що протікають у рідкій фазі.

Під час використання ультразвуку необхідно розглядати основні закони поширення ультразвуку й виявити величини, що характеризують звукове поле. Таким чином, теорія ультразвукових коливань є основою проектування УЗКС й застосування ультразвукових коливань у промисловості для тендеризації м'яса та м'ясної сировини.

2.2. Модель, що описує плоску, однорідну звукову хвилю й швидкість звука

Під час дослідження розповсюдження ультразвукових коливань використовують модель, що описує плоску однорідну звукову хвилю й швидкість звуку, тому що всі найважливіші закономірності чітко проявляються вже в цій найпростішій моделі.

Хвильове рівняння, що описує пружне й поздовжнє до напрямку поширення збудження матеріальних часток, має наступний вигляд

$$\frac{d^2a}{dt^2} = c \frac{d^2a}{dx^2}. \quad (2.1)$$

Ця аналітична модель відповідає найпростішій фізичній моделі, яку представлено на рис. 2.1.

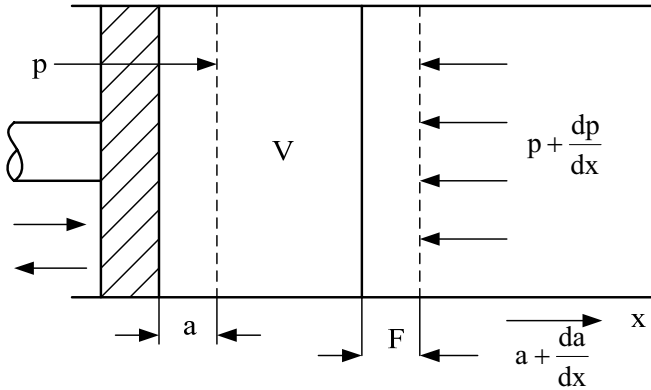


Рис. 2.1. Фізична модель однорідної плоскої звукової хвилі

Фізична модель являє собою трубу, заповнену газом (наприклад, повітрям), вісь цієї умовної труби збігається з віссю x , а площа поперечного перерізу дорівнює одиниці площі (наприклад, 1 м^2).

Ліворуч у трубі є поршень, що рухається по осі труби на величину a . Тиск, який виникає при цьому, поширюється праворуч із кінцевою швидкістю й частки повітря, розташовані в поперечному перерізі F , що перебувають від поршня на відстані одиниці (наприклад, на відстані в 1 см), зміщуються вправоруч на величину $a + (da/dx)$. Отже, об'єм повітря, що міститься в одиничному об'ємі, змінюється

$$\frac{dV}{V} = \frac{da}{dx}. \quad (2.2)$$

Для адіабатичних процесів, що мають місце при звукових коливаннях у газах

$$pV^k = \text{const}, \quad (2.3)$$

де p – тиск газу, Па;

k – відношення питомої теплоємності при постійному тиску й при постійному об'ємі.

Якщо продиференціювати (2.3), можна одержати рівняння

$$\frac{dp}{p} = -k \frac{dV}{V} = -k \frac{da}{dx}. \quad (2.4)$$

Якщо тиск у газі в стані спокою дорівнює p_0 , тоді під час руху поршня, рис. 2.1, тиск буде змінюватися за законом

$$p = p_0 - kp_0 \frac{da}{dx}. \quad (2.5)$$

Якщо тиск, яким поршень тисне на газ у трубі, становить p , то на протилежну поверхню одиничного об'єму F діє тиск $p + (dp/dx)$.

Різниця цих двох величин дає перепад тиску, або силу, що діє на одиничний об'єм газу, має вигляд

$$K = -\frac{dp}{dx} = kp_0 \frac{d^2a}{dx^2}. \quad (2.6)$$

Відповідно до законів механіки, ця сила дорівнює добутку маси газу в одиничному об'ємі на його прискорення має вигляд

$$kp_0 \frac{d^2a}{dx^2} = k\rho_0 \frac{d^2a}{dt^2}, \quad (2.7)$$

де ρ_0 – початкова густина газу кг/м^3 .

Формулу (2.7) можна записати як:

$$\frac{d^2a}{dt^2} = \left(k \frac{p_0}{\rho_0} \right) \frac{d^2a}{dx^2}, \quad (2.8)$$

що повністю збігається з первісним хвильовим рівнянням (2.1), але в круглих дужках (2.8) відокремлено аналітичне рівняння для швидкості звуку в газах. Таким чином, швидкість звуку в газах буде дорівнювати

$$c = \sqrt{k \frac{p_0}{\rho_0}}, \quad (2.9)$$

де k – відношення питомої теплоємності за постійного тиску й постійного об'єму;

p_0 – тиск газу, що перебуває в спокої, Па;

ρ_0 – густина газу кг/м^3 .

Для визначення швидкості звуку в рідинах формулу (2.9) можна перетворити

$$c^2 = k \frac{dp}{d\rho}, \quad (3.10)$$

відповідно до співвідношення $p = \text{const}/V$, можна одержати

$$c^2 = -k \frac{Vdp}{\rho dV}. \quad (2.11)$$

Величина $(-1/V)(d/dp)$ – ізотермічна здатність до стиснення β_{is} , і, отже, формула (2.9) матиме вигляд

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho \beta_{is}}}, \quad (2.12)$$

(у такій формі запису виражається зазвичай швидкість звуку в рідинах).

2.3. Ультразвукова хвиля та її інформативні параметри

Ультразвуковій хвилі властиві власні інформативні параметри [14]. Наступні висновки зроблені в припущенні, що поршень фізичної моделі (рис. 2.1.) зворотно переміщається уздовж осі труби за гармонійним законом, частинне рішення рівняння (2.1) для параметра a визначається як

$$a = A \cdot \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (2.13)$$

де a – зсув часток середовища щодо середнього положення, м;
 A – амплітуда зсуву часток, м;
 ω – кутова частота с^{-1} ;
 t – час, с;
 c – швидкість звуку м/с;
 x – лінійна координата по осі труби.

Рівняння (2.13) описує плоску гармонійну хвилю частоти $f = (\omega/2\pi)$, що поширюється в позитивному напрямку осі x (рис. 2.1.), описує гармонійний процес, як у часі, так і в просторі.

Якщо вважати просторову координату $x = \text{const}$, то рівняння (2.13) має вигляд

$$a = A \cdot \sin \omega \cdot (t - \varphi), \quad (2.14)$$

де $\varphi = x/c$ – фазова постійна.

Рівняння (2.14) визначає коливання часток середовища в перетині труби, що відповідає постійній координаті x .

Два наступні стани часток, у перетинах x_1 і x_2 , за однаковою фазою коливань, утворюють період коливань T .

Тому

$$\omega \cdot [(t + T) - \varphi] - \omega \cdot (t - \varphi) = 2\pi, \quad (2.15)$$

де f – частота звукових коливань, Гц;

$$f = \frac{1}{T}, \quad (2.16)$$

Якщо у рівнянні (2.13) час t – постійний, рівняння матиме вигляд

$$a = A \sin \omega \cdot \left(\varphi'' - \frac{x}{c} \right), \quad (2.17)$$

що визначає періодичний процес щодо напрямку поширення x .

Дві сусідні точки звукової гармонійної хвилі на осі x , з однаковою фазою коливань, пов'язані співвідношенням

$$\omega \cdot \left(\varphi'' - \frac{x + \lambda}{c} \right) - \omega \cdot \left(\varphi'' - \frac{x}{c} \right) = 2\pi. \quad (2.18)$$

Тоді

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.19)$$

де λ – довжина хвилі звукових (або ультразвукових) коливань, м.

Використовуючи отримані співвідношення, вхідне рівняння (2.13) можна записати

$$a = A \sin 2\pi \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x). \quad (2.20)$$

Якщо коливання часток середовища відбуваються в напрямку поширення хвилі, це поздовжні коливання. Для поздовжніх коливань, які розглядаються, звукові хвилі складаються із тисків і розріджень з періодичністю T , що чергуються, де частки середовища зворотно коливаються уздовж осі x .

Загальне рівняння для швидкості руху часток середовища можна одержати, диференціюючи по t (2.13) або (2.14)

$$U = \omega A \cos \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) = \frac{2\pi}{T} A \cos \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (2.21)$$

Відповідно до цього рівняння, швидкість часток коливається від нуля до деякої максимальної величини.

Отже максимальна амплітуда коливальної швидкості буде дорівнювати

$$U = A\omega. \quad (2.22)$$

Можна зробити висновок, що чим більша частота коливань, тим більша амплітуда коливальної швидкості часток та частота коливань, тим швидше частки середовища повинні переміщатися.

Прискорення часток середовища можна знайти, диференціюючи ще раз за температури t рівняння (2.21)

$$b = -\omega^2 A \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) = -\frac{4\pi^2}{T^2} A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right). \quad (2.23)$$

Таким чином, максимальна амплітуда прискорення часток

$$B = -\omega^2 A = -\omega U. \quad (2.24)$$

Можна зробити висновок, що у звуковій або в ультразвуковій хвилі:
– швидкість переміщення часток середовища зростає пропорційно частоті;

– прискорення часток зростає пропорційно квадрату частоти коливань (за умови, що амплітуда A звуку часток залишається незмінною).

2.4. Енергія звукової хвилі

Відмінна риса хвильового руху звукової хвилі – перенесення енергії в позитивному напрямку координати x (рис. 2.1.). Причому, у процесі коливань енергія періодично – з періодом $T/2$ – переходить із потенційної (з області тиску) у кінетичну (під час руху часток і утворенні зони розрідження). Оскільки кожна частка середовища коливається щодо свого середнього положення (або положення рівноваги), то в класичному хвильовому процесі має місце передача енергії без перенесення речовини (тобто часток середовища). Елементарною фізичною моделлю такого процесу може бути система куль, розташованих на прямій лінії, які з'єднані між собою пружинами. Під час удару по першій кулі всі кулі від другої до останньої будуть коливатися щодо своїх середніх положень, за зворотно-поступальним рухом відносно середнього положення останньої кулі з кінцевою масою й визначать перенесення енергії удару від першої кулі до останньої. Крім того існує ще важливий момент, що стосується фізики перенесення енергії звуковою хвилею:

– за дуже великих питомих потоках звукової енергії можливий поступальний рух матеріальних часток газу або рідини в напрямку поширення (як під час вибуху).

У фізичній моделі з кулями і з'єднуючими їх пружинами: за дуже

сильному ударі по першій кулі вся система куль і пружин буде зміщуватися в напрямку поширення. Цей складний і «нестандартний» процес перенесення енергії звуку називають явищем «звукового вітру». Перенесення енергії звуку здійснюється як за рахунок коливання часток середовища щодо своїх середніх положень, так і за рахунок зсуву всієї маси речовини середовища в напрямку поширення. У виробництві ефект «звукового вітру» з успіхом застосовують для безконтактного змішування або розподілу агресивних рідин і слабопоточних композицій, інтенсифікації технологічних процесів, які протікають у рідкому середовищі, при розгляданні фізичної сутності перенесення енергії звуковою хвилею (це поздовжнє коливання матеріальних часток відносно середніх своїх положень) і фізичне перенесення енергії електромагнітним полем (поперечне до напрямку поширення коливання двох векторів E та B , що утворюють вектор Умова-Пойнтинга), при цьому помітна принципова відмінність першого процесу від іншого.

У першому випадку, це фактично механічний коливальний процес, параметри якого описуються законом механіки. У другому випадку, це безперервний потік електромагнітної енергії, що може бути описаний лише законами електродинаміки.

Якщо густину середовища, у якій поширюється хвиля, позначити через ρ , то кінетична енергія в одиниці об'єму буде дорівнювати

$$E_k = \frac{1}{2} \rho U^2 = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (2.25)$$

Середня кінетична енергія в одиниці об'єму, з огляду на середнє значення квадрата косинуса, що дорівнює $1/2$, буде

$$E_k = \frac{1}{4} \rho \omega^2 A^2. \quad (2.26)$$

Середнє значення потенційної енергії \bar{E}_p в одиниці об'єму виражається тією ж величиною. Тому повна середня енергія звукової хвилі в одиниці об'єму розраховується як

$$\bar{E}_\Sigma = \bar{E}_k + \bar{E}_p. \quad (2.27)$$

Величину \bar{E}_Σ ще називають повною середньою енергією звукової

хвилі в одиниці об'єму, і аналітично вона може бути записана наступним чином

$$\bar{E}_{\Sigma} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 = 2\pi r f^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho U^2. \quad (2.28)$$

У плоскій звуковій хвилі середня енергії залишається постійною, тому що поверхня хвильового фронту, що з'єднує точки з однаковою фазою, через яку проходить енергія, не змінюється. У повітрі, у різних середовищах, у матеріалах сформований звуковий пучок не може зберігати фронт своєї хвилі плоским. Реально звуковий пучок розширюється і при цьому відхиляється від площини його фронт, енергія звукової хвилі розподіляється в більшому тілесному куті. У сферичних звукових хвилях, випромінюваних точечним джерелом, енергія, що проходить через одиницю поверхні хвильового фронту, зменшується пропорційно квадрату відстані від джерела.

Центром збудження, так званих, циліндричних хвиль, є пряма лінія, тому енергії звукової хвилі зменшується пропорційно першого ступеня відстані від джерела звуку. Формування необхідного хвильового фронту ультразвукового випромінювання ультразвуковим перетворювачем – це конкретне завдання при проектуванні УЗКС.

2.5. Сила та інтенсивність звуку

Із густиною енергії у звуковій хвилі простим чином пов'язані сила або інтенсивність звуку F . Під силою звуку F мають на увазі енергію, що проходить за одиницю часу через одиничну поверхню, орієнтовану нормально до напрямку поширення хвилі.

У плоскій хвилі сила звуку дорівнює енергії, прикладеної до паралелепіпеда, площа основи якого дорівнює одиниці площі 1 м^2 , а висота визначається швидкістю звуку c у м/с для даного середовища. Об'єм такого умовного паралелепіпеда буде вимірятися в м^3 , а енергія, що міститься в 1 м^3 визначається за формулою

$$E_v = \frac{F}{c}, \quad (2.29)$$

звідси для сили звуку можна одержати рівняння

$$F = \bar{E}_v c = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho c}{\omega^2} B^2 = \frac{1}{2 \rho c U^2}. \quad (2.30)$$

З формули (2.30), сила звуку залежить від густини середовища ρ , швидкості поширення звуку c і квадрата амплітуди коливальної швидкості U . Сила звуку вимірюється у Вт/м².

Якщо інтегрувати силу звуку F у Вт/м² по замкненій поверхні S , що охоплює джерело звуку або ультразвуку, то можна визначити загальну акустичну енергію $E_{\text{вип}\Sigma}$, яку випромінює джерело звуку в одиницю часу

$$E_{\text{вип}\Sigma} = \oint_S F dS. \quad (2.31)$$

Тобто у результаті інтегрування можна одержати повну акустичну потужність джерела звуку $E_{\text{вип}\Sigma}$, що вимірюється у Вт.

Сила звуку F є інформативним параметром, за яким, наприклад, знаючи розміри апертури в м² акустичного приймача і його чутливість у Вт, можна встановити енергетичний діапазон його роботи. Сила звуку також є однією з основних характеристик УЗКС, що визначають ефективність їхнього застосування.

З формули (2.30), сила звуку за всіх інших рівних умов залежить від густини середовища ρ , де поширюється ультразвукова хвиля.

Під час отримання рівняння для тиску у звуковій хвилі D використовується ньютонівське рівняння руху. Відповідно до нього, добуток густини ρ одиниці об'єму на прискорення b повинен дорівнювати силі, що діє на одиничний об'єм, у якості якого в звуковій хвилі приймається перепад тиску в напрямку її поширення, це величина d/dx . Рівняння руху відносно звукової хвилі в газі

$$\rho b = - \frac{dD}{dx}, \quad (2.32)$$

або з урахуванням рівняння (2.23) можна записати

$$-\rho \omega^2 A \sin \omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) = - \frac{dD}{dx}. \quad (2.33)$$

Якщо інтегрувати рівняння (2.33) по x , безпосередньо можна знайти залежність звукового тиску D від координати й часу

$$D = D_0 + A\rho c\omega \cos\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right), \quad (2.34)$$

де D_0 – атмосферний тиск у відсутності звукового поля, Па.

$$D_A = \rho c \omega A = \rho c U, \quad (2.35)$$

де D_A – амплітуда звукового тиску, м.

Величина D_A за даної сили звуку (2.30) не залежить від частоти звукових коливань, тому за величиною амплітуди звукового тиску можна визначити силу звуку. Для цього застосовують співвідношення

$$F = \frac{D_A^2}{2\rho c} = \frac{D_A U}{2}. \quad (2.36)$$

Якщо врахувати, що максимум і мінімум тиску лежать в межах однієї довжини хвилі в напрямку її поширення, у звуковому полі мають місце градієнти тиску. Рівняння для цих градієнтів можна знайти, диференціюючи рівняння (2.34) по x

$$\frac{dD}{dx} = A\rho c\omega^2 \sin\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right) = \frac{\omega D}{c} \sin\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c} \right). \quad (2.37)$$

Середній градієнт тиску $\overline{\Delta D}$ на ділянці звукової хвилі між точками максимуму й мінімуму звукового тиску буде дорівнювати

$$\overline{\Delta D} = \frac{2\rho}{\pi} B, \quad (2.38)$$

де $\overline{\Delta D}$ – середній градієнт тиску, Па/см²,

B – амплітуда прискорення часток середовища м/с².

За всіх інших рівних характеристиках звукової хвилі перепад

звукового тиску пропорційний густині середовища.

Усі параметри звукової хвилі в значній мірі визначаються властивостями середовища, в якому поширюється хвиля. Питома , «в'язкість», «пружність» середовища (механічні характеристики), звичайно, заважають, поширенню звукової хвилі. Для оцінки «опірності» середовища хвильовому поширенню звуку введені дві константи.

Перша константа – це акустична твердість середовища, яка відображає залежність звукового тиску D від амплітуди звуку частот середовища A ; та розраховується як

$$Q_{A.T.} = \rho c \omega = \frac{D}{A}. \quad (2.39)$$

Константа $Q_{A.T.}$ в практиці акустичних розрахунків має обмежене застосування, тому що безпосередньо пов'язана із частотою ω , що й обмежує загальність оцінки «опірності» середовища поширенню звукових хвиль.

Друга константа – це хвильовий (або акустичний) опір середовища, яка більш наочно й узагальнено показує його «опірність» поширенню звукових хвиль. За аналогією з електротехнікою в акустиці, як правило, використовують термін акустичного опору R_A . Величина R_A пов'язана лише із двома параметрами: ρ – густиною середовища й швидкістю поширення звукових хвиль у цьому середовищі – c , та розраховується як

$$R_A = c\rho = \frac{D}{U}. \quad (2.40)$$

У зв'язку з цим визначається своєрідна й незвичайна для терміна «опір» – розмірність акустичного опору R_A . Як видно з формули (2.40), акустичний опір R_A у діючій системі одиниць вимірюється в $\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

За даними розрахунками й експериментами, які підтверджують літературні джерела [34], для різних середовищ абсолютні значення R_A досить різко відрізняються один від одного.

Форма запису акустичного опору записується у такий вигляд

$$R_A = \frac{D}{U}, \quad (2.41)$$

де D – амплітуда звукового тиску, Па;

U – максимальна амплітуда коливальної швидкості, м/с.

За формою запису акустичний опір зовні збігається з формою запису електричного законом Ома. Тому останнє співвідношення (2.41) вважають акустичним аналогом закону Ома.

Але між електричним законом Ома і його акустичним аналогом, спорідненість лише зовнішня, а існуючі відмінності принципові. Акустичний опір R_A на противагу омичному опором R аж ніяк не визначає енергію, перетворену в теплоту. Це принципова розбіжність між R_A і R підтверджується їхньою розмірністю в Омах.

Константа R_A показує лише «опірність» середовища поширенню звукових хвиль, тому абсолютно пружні середовища без втрат (тобто середовища, у яких енергія звукових коливань зовсім не перетворюється в теплоту) також характеризуються акустичним опором.

У цьому випадку вірніше ототожнювати акустичний опір R_A із хвильовим опором довжини лінії без омичних втрат, де немає перетворення електричної енергії в теплоту. В ультразвуковій техніці акустичний опір R_A є найважливішим інформативним параметром. Так, на межі розділу середовищ, або матеріалів з різними значеннями акустичних опорів обов'язково виникають відбиті хвилі. Неоднорідності в матеріалах, що мають відмінні від основної маси матеріалу акустичні опори, також викликають відбиття.

2.6. Тиск акустичного випромінювання

Тиск випромінювання, або тиск звуку, виникає у разі зустрічі звукової хвилі з перешкодою. Відрізняють звуковий тиск D та тиск випромінювання, або тиск звуку S .

У першому випадку звукового тиску D , можна визначити перепади тиску безпосередньо у звуковій хвилі, що поширюється.

У другому випадку тиск звуку S – це механічний тиск звукової хвилі на перешкоду, який нормальний до напрямку її поширення. Під час зустрічі з перешкодою звукові хвилі віддають їй частину своєї енергії. При цьому частки середовища й перешкоди коливаються однаково. Щоб визначити середній тиск звуку S на перешкоду, необхідно обчислити усереднений тиск біля перешкоди за період коливань. Для «твердого» відбивача, що перебуває в газі, в середину якого звукове поле практично не проникає, середній тиск звуку S оцінюється наближеною формулою Релея

$$\bar{S} = (1 + k)\bar{E}_\Sigma, \quad (2.42)$$

де k – відношення питомих теплоємностей газу за постійного тиску й постійного об'єму;

\bar{E}_Σ – середня енергії у звуковій хвилі Дж/м³.

\bar{S} , – тиск звуку на перешкоду, кг/см².

Для рідин, які мають постійну здатність стискатися, з формули (2.42) можна одержати $\bar{S} = 0$. На практиці це не так, тому що тиск звуку завжди існує й у рідинах. В рідинах розповсюджуються звукові хвилі, які пронизують не збуджену звуковими коливаннями рідину. У цих випадках між звуковою хвилею й не збудженою рідиною виникає гідростатична взаємодія під час його зустрічі з перешкодою, результатом якої є механічний тиск звуку. Теоретичний аналіз тиску звуку на перешкоди в рідинах дуже складний, він не має принципового значення, тому це питання не розглядається.

Звукові й ультразвукові хвилі при поширенні в реальних середовищах і матеріалах завжди послабляються. Ослаблення звуку відбувається з різних причин, які залежать від фізичних властивостей середовища або матеріалу, але головна причина – це опір тертя матеріальних часток, які коливаються у звуковому полі.

Відповідно до моделі (рис. 2.1), амплітуда плоскої хвилі у точці x становить A_x ; її ослаблення dA на відрізку dx пропорційно довжині відрізка dx ; та початковій величині A

$$-dA = \alpha_A A_x dx, \quad (2.43)$$

де α_A – коефіцієнт згасання звукової хвилі за амплітудою.

Інтегруючи останнє рівняння за x , можна одержати

$$A_x = A_0 e^{-\alpha x} = A_0 \exp[-\alpha x], \quad (2.44)$$

де A_0 – амплітуда коливань у точці $x=0$;

α – коефіцієнт згасання амплітуди коливань, постійний для даного середовища.

Підносячи рівняння (2.44) до квадрату, можна одержати аналогічне співвідношення, але для загасання звукової хвилі за потужністю (за силою звуку):

$$P_x = P_0 e^{-2\alpha x} = P_0 \exp[-2\alpha x], \quad (2.45)$$

де $2\alpha x$ – коефіцієнт загасання звукової хвилі за потужністю.

Формула (2.45) записана для загасання за потужністю, а не за силою звуку, тому що практично всі прилади, що реєструють ультразвукові коливання, та ультразвукові перетворювачі розраховують й проєктують, виходячи із вхідної потужності.

Якщо застосувати формули (2.44) і (2.45), можна одержати згасання ультразвукових хвиль, тому що

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{x_2 - x_1} \ln \left(\frac{A_x}{A_0} \right) \\ \alpha &= \frac{1}{2(x_2 - x_1)} \ln \left(\frac{P_x}{P_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

З формул (2.44), (2.45) і (2.46), згасання звукових коливань як за амплітудою, так і за потужністю в однорідному середовищі або в однорідному матеріалі, відбувається за експонентними законами, але з різною інтенсивністю.

Основні параметри ультразвукових коливань :

c – швидкість звукових коливань у середовищах і матеріалах, м/с;

λ – довжина хвилі, м;

\bar{E} – енергії звукової хвилі, Дж/м³ або Вт·с/м³;

F – сила звуку, Вт/м², або сила звуку відносно граничної сили звуку, дБ;

$E_{\text{вип}\Sigma}$ – акустична потужність джерела звуку Вт;

D – тиск звукової хвилі, $\cdot 10^5$ Па або 1кгс/см²;

R_A – акустичний опір середовища або матеріалу, кг·м⁻²·с⁻¹;

α – загасання звукових і ультразвукових хвиль у середовищах і матеріалах, Нп/м або дБ/м.

Ці величини записують зі знаком «-», тобто -Нп/м і -дБ/м.

2.7. Проходження хвилі через межу розподілу двох середовищ

У разі падіння плоскої звукової хвилі на межу розподілу двох середовищ з різними площинами й швидкостями звуку (з різними акустичними опорами) частина енергії відбивається, а частина проходить у

друге середовище. Зокрема кут відбиття дорівнює куту падіння, а енергія, що проходить у друге середовище, підкоряється закону заломлення Снелюса, згідно з яким, відношення синусів кутів падіння й заломлення дорівнює відношенню швидкостей звуку в обох середовищах.

У цьому випадку має місце певна зовнішня аналогія із проходженням розподілу двох середовищ електромагнітними хвилями, хоча фізична природа акустичних і електромагнітних полів принципово різні. Але об'єднує їх те, що відношення швидкостей звуку та відносних діелектричних проникностей середовищ називають коефіцієнтом заломлення першого середовища відносно іншого.

Відносні інтенсивності (за амплітудою або за силою звуку, або за потужністю) відбитих і заломлених звукових хвиль визначаються співвідношеннями Релея.

Ці співвідношення справедливі лише для середовищ без втрат, у яких відсутнє загасання, тобто поглинання звуку, а межа розподілу середовищ плоска, досить протяжна та має мікронерівності, розміром набагато меншими за довжину звукової хвилі. Такі умови на практиці виконуються лише в окремих випадках. Тому на практиці співвідношення Релея в загальному вигляді не розглядаються, частіше застосовуються під час аналізу окремих випадків, які характерні для акустичних середовищ.

Під час проведення ультразвукових розрахунків найчастіше застосовують випадок нормального падіння звукової хвилі на межу розподілу середовищ і матеріалів. Для цього варіанту будуть відсутні відбиття від межі розподілу середовищ, за умови рівності акустичних опорів середовищ

$$R_{A1} = R_{A2} = \rho_1 c_1 = \rho_2 c_2. \quad (2.47)$$

Рівняння (2.47) визначає умови повного узгодження середовищ, які завжди необхідно виконувати при розрахунку й проектуванні УЗКС, що гарантує максимальну енергетичну ефективність процесу ультразвукового випромінювання.

Для зручності розрахунків використовують коефіцієнт, що визначає відношення акустичних опорів обох середовищ

$$m = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} = \frac{R_{A1}}{R_{A2}}. \quad (2.48)$$

Виходячи зі співвідношення Релея, можна знайти коефіцієнт

відбиття k_{Γ} від межі розділу середовищ, який за нормального падіння хвилі дорівнює

$$k_{\Gamma} = \left(\frac{m-1}{m+1} \right)^2 = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right) = \left(\frac{R_{A2} - R_{A1}}{R_{A1} + R_{A2}} \right). \quad (2.49)$$

Формула (2.49) визначає коефіцієнт відбиття k_{Γ} за потужністю, тобто за інтенсивністю звуку, тому що записані квадрати співвідношень. Ті ж самі співвідношення формули (2.49), але не зведені у квадрат, дають значення коефіцієнта відбиття за амплітудою. Основні співвідношення Релея дозволяють записати відносне значення коефіцієнта пропускання k_D за інтенсивністю випромінювання

$$k_D = 1 - k_{\Gamma} = \frac{4m}{(m+1)^2}. \quad (2.50)$$

Можна зробити висновок, що значення k_{Γ} , як і значення k_D , залежать лише від відношення акустичних опорів середовищ, що утворюють межу розділу фаз. Рівняння (2.49) і (2.50) формально не зміняться, якщо m замінити на $1/m$, тобто умовно замінити перше середовище іншим.

Коефіцієнти k_{Γ} і k_D є чисто енергетичними коефіцієнтами, які показують відносні величини відбитої енергії та енергії, яка проходить незалежно від того, з якої сторони межі розподілу перебуває вхідна звукова хвиля.

На рис. 2.2 наведено залежності k_{Γ} і k_D від m (або від $1/m$, що рівнозначно), тому що ними показують, як відрізняються акустичні опори дотичних середовищ або матеріалів.

Розрахунки за формулами (2.49) і (2.50), а також експерименти, які їх підтверджують, показують, що при переході звукових хвиль із рідин у повітря, або з повітря в рідину, або в тверде тіло коефіцієнт відбиття за енергією звукових хвиль наближається до 100% [50].

Експериментальні дані з вимірювання поглинання енергії мають деякі розбіжності з теоретичними даними, оскільки причиною цього є випромінювання елементів середовища. Стокс і Кірхгоф пояснюють поглинання звуку впливом теплопровідності і внутрішнього тертя.

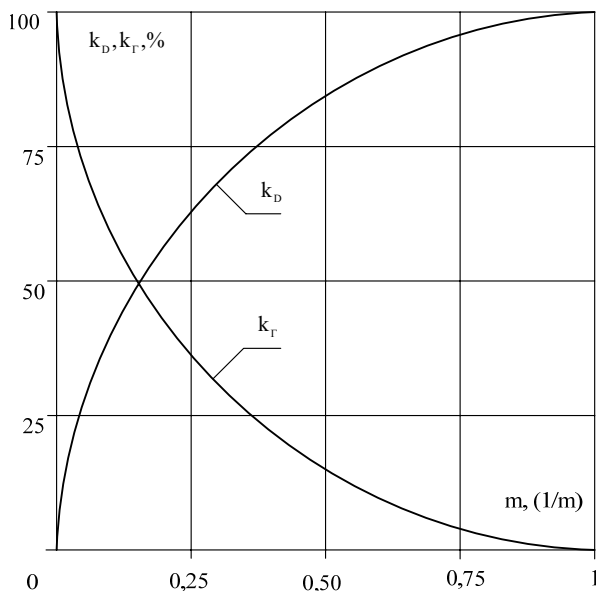


Рис. 2.2. Залежність коефіцієнтів k_r і k_D від акустичних опорів двох середовищ

Згідно з рівнянням Стокса, частина поглинання, зумовлена в'язкістю, буде дорівнювати

$$\alpha_1 = \frac{8\pi^2 f^2 \eta}{3c_3 \rho}, \quad (2.51)$$

Поглинання за рахунок теплопровідності, згідно з рівнянням Кірхгофа, має вигляд

$$\alpha_2 = \frac{2\pi^2 f^2}{c_3 \rho} \cdot \frac{\gamma - 1}{C_p} k. \quad (2.52)$$

Рівняння поглинання у загальному вигляді має наступний вигляд

[52]

$$2\alpha = \frac{4\pi^2 f^2}{c_3 \rho} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{\gamma - 1}{C_p} k \right), \quad (2.53)$$

де η – коефіцієнт в'язкості, Па·с;

ρ – середня густина, кг/м³;

c_3 – швидкість звуку в середовищі, м/с;

γ – відношення питомих теплоємностей;

C_p – питома теплоємність за постійного тиску кДж/кг·К;

k – коефіцієнт теплопровідності Вт/м·К.

Результати розрахунків за розділом 2 наведені у розділі 4 та додатку Д.1. Із вище викладеного можна зробити висновок, що основними параметрами УЗКС є швидкість звукових коливань у середовищах і матеріалах, довжина хвилі, густина енергії звукової хвилі, сила звуку, акустична потужність джерела звуку, тиск звукової хвилі, акустичний опір середовища або матеріалу, загасання звукових і ультразвукових хвиль у середовищах і матеріалах.

Енергія ультразвукових хвиль під час проходження через середовище розсіюється, це зумовлено наявністю внутрішнього тертя в середовищі, яке викликає загасання цих хвиль. Теплопровідність і випромінювання елементів середовища, яке перебуває під дією розтягнення і стиснення, також відіграють велику роль у втратах енергії хвилі.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ ДІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ НА М'ЯСО З ВИСОКИМ ВМІСТОМ СПОЛУЧНОЇ ТКАНИНИ

3.1. Вплив ультразвукових коливань на процеси масообміну, та механізм дії на біологічні об'єкти

Ультразвуковим коливанням притаманні особливі властивості внаслідок великої частоти й малої довжини хвилі. Подібно до світла ультразвукові хвилі можуть утворювати строго спрямовані пучки. Відбиття й заломлення цих пучків на межі двох середовищ підпорядковується законам фізики. Під час випромінювання УЗК у рідину створюються зони стиснення та розрядження, рідина розривається й у ній утворюється велика кількість розривів (бульбашок), в які спрямовуються розчинені в рідині гази й пара. Ці дрібні бульбашки (розміром, менш 0,1 мм), називають кавітаційними, утворюються звичайно в місцях, де міцність рідини ослаблена: такими місцями є маленькі бульбашки нерозчиненого газу, часточки сторонніх домішок, межі поділу фаз рідина-рідина, рідина-тверде тіло й ін. Кавітаційні бульбашки створюють пульсуючі коливання, навколо них утворюються сильні мікропотоки, що призводять до активної локальної турбулізації середовища [69; 70].

Після короточасного існування частина бульбашок схлопується. При цьому спостерігаються локальні миттєві тиски, що досягають $\cdot 10^7 \dots 10^8$ Па. Під час захоплення кавітаційних бульбашок спостерігаються також локальні підвищення температури й електричні розряди. Проведені дослідження показали, що вплив ультразвукових коливань на різні середовища зумовлений ефектами кавітації, ультразвукового вітру й ультразвукового тиску, причому максимальний вплив зумовлений ультразвуковою кавітацією. Практично всі фізико-хімічні й технологічні процеси протікають на межі поділу фаз (міжфазної поверхні), де молекули різних речовин зіштовхуються між собою.

Як свідчать літературні дані [71; 72], поблизу поверхні твердого тіла формується шар рідини, названий дифузійним граничним шаром, у якому зосереджений основний опір перенесенню молекул реагуючих речовин до міжфазної межі або віднесення продуктів реакції. Причому основний опір робить дифузійний шар, що безпосередньо прилягає до твердого тіла. У цій області перенесення здійснюється молекулярною дифузією. Швидкість технологічних процесів можна збільшити за рахунок зменшення товщини або повного усунення дифузійного граничного шару.

У разі проходження УЗ хвилі через рідину виникає УЗ кавітація та зумовлені нею потужні мікропотоки рідини, а також ультразвукові вітер і

тиск впливають на граничний шар і «змивають» його. При цьому опір перенесенню молекул реагуючих речовин значно зменшується й швидкість процесів масообміну та масопереносу за рахунок цього зростає.

Крім товщини дифузійного граничного шару швидкість процесів масообміну та масопереносу залежить від величини поверхні контакту реагуючих компонентів. Тому збільшення поверхні контакту реагуючих речовин також збільшує швидкість протікання процесів масообміну та масопереносу.

Під час проходження ультразвукових хвиль у середовищі виникає ультразвуковий вітер, який викликає інтенсивне переміщення й потужні мікропотоки від кавітаційних бульбашок, що захоплюються та призводять до взаємного тертя твердих часток, які рухаються в рідині і їх надтонкому подрібнюванні (яке неможливо здійснити іншими методами). Надтонке подрібнення збільшує міжфазну поверхню реагуючих компонентів, що, у свою чергу, збільшує швидкість протікаючих процесів. Аналогічні фізичні процеси протікають і в системах, що складаються із двох і більше рідких компонентів.

У такий спосіб ультразвукові коливання, що поширюються в рідких середовищах, призводять до збільшення питомої поверхні взаємодії й зменшення величини дифузійного, граничного шару, забезпечуючи тим самим багаторазове прискорення процесів масообміну та масопереносу. Крім цих двох основних чинників, в ультразвуковій хвилі виникають різні вторинні ефекти (електричні розряди в кавітаційних бульбашках, величезні температури в дуже маленьких обсягах оброблюваних речовин, ударні хвилі й ін.).

За умов порівняння даних за граничними інтенсивностями, за яких відбувається руйнування тканин, виявилось, що за інтенсивностей звуку менше $2 \cdot 10^3$ Вт/см² і часу експозиції менше $4 \cdot 10^{-2}$ с, працює кавітаційний механізм, а у випадку, коли час експозиції перевищує 1с, а інтенсивність звуку менше, ніж 200 Вт/см² працює механізм теплового руйнування. У проміжній області механізм руйнування не зрозумілий. Під акустичною кавітацією мають на увазі утворення й активацію газових або парових порожнин (бульбашок) у середовищі, що піддається ультразвуковому впливу.

За загальноприйнятою термінологією існують два типи активності бульбашок: стабільна та нестационарна кавітація, хоча межа між ними не завжди чітко окреслена [73; 74].

Стабільні порожнини пульсують під впливом тиску ультразвукового поля. Радіус бульбашки коливається біля рівноважного значення, порожнина існує протягом значного числа періодів звукового

поля. З активністю такої стабільної кавітації може бути пов'язане виникнення акустичних мікропотоків і високих напружень зсуву. Нестационарні порожнини, які колапсують, осцилюють хитливо біля своїх рівноважних розмірів, виростають у кілька разів і енергійно схлопуються. Малі бульбашки можуть рости внаслідок процесу, названого випрямленою або спрямованою дифузією. Пояснення цього явища полягає в тому, що за період акустичного поля газ по черзі дифундує в бульбашку під час фази розрідження й з бульбашки під час фази стиску. Тому, що поверхня бульбашки у фазі розрідження максимальна, сумарний потік газу спрямований усередину пухирця, тому пухирець росте. Щоб пухирець ріс за рахунок випрямленої дифузії, амплітуда акустичного тиску повинна перевищити граничне значення. Поріг випрямленої дифузії й визначає поріг кавітації.

Сучасні технології найчастіше ґрунтуються на реалізації гетерогенних процесів, що протікають між двома або декількома неоднорідними середовищами в системах «рідина-рідина» і «рідина-тверде тіло» [75; 76]. Механізм дії на поверхню розділу рідин або твердого тіла і рідини: збільшення міжфазної поверхні взаємодії; дія на граничний шар на межі розподілу «рідина-рідина», «рідина-тверде тіло»; руйнування (змивання) граничного шару потоками кавітації, яка виникає під дією коливань у рідині [77; 78]. Кавітація та потужні мікропотоки, які її супроводжують, звуковий тиск і звуковий вітер впливають на граничний шар і усувають опір перенесенню реагуючих речовин та інтенсифікують технологічний процес [79; 80].

Фундаментальні дослідження масообміну були проведені багатьма авторами. Позитивний вплив УЗ коливань на процеси масообміну в системі «тверде тіло-рідина» зареєстровано багатьма дослідниками [81; 82]. Під час дії ультразвуку швидкість процесу зростає в 3...20 разів. Багдасаров Х. С. [83] здійснив візуалізацію дифузійного граничного шару на поверхні об'єкта, що розчиняється, за умов УЗ коливань у рідині. За дії ультразвуку будова дифузійного шару змінилася. У дифузійному шарі розрізнялися місця з найбільшою і найменшою густиною розчинної речовини. Теоретично обґрунтовується і практично підтверджується «плямиста структура» поверхні розчинення; піки чергуються впадинами, а відстань між піками або впадинами залежить від довжини хвилі і напрямку розповсюдження коливань. Дія ультразвуку прискорює процес на 30...40 % порівняно з механічним перемішуванням. Встановлений також вплив УЗ коливань на процеси дифузійного проникнення розчиненої речовини в колоїдне тіло.

Оцінка специфічної дії ультразвуку на кінетику дифузійних процесів в гетерогенних системах наведена в роботі Кортнева А. В. [84].

Найважливішим аспектом цього дослідження є аналіз впливу УЗ дії на дифузійне перенесення речовини в рідкому середовищі, який визначається ступенем кавітації, товщиною і властивостями дифузійного шару на твердій поверхні, дифузійною проникністю твердих матеріалів.

Із вище викладеного можна зробити висновок, що вплив ультразвукових коливань на різні середовища зумовлений ефектами кавітації, ультразвукового вітру й ультразвукового тиску. У процесах які протікають на межі розподілу фаз ультразвукові коливання, що поширюються в рідких середовищах, призводять до збільшення питомої поверхні взаємодії й зменшення величини дифузійного, граничного шару, забезпечуючи тим самим багаторазове прискорення процесів масообміну та масопереносу. Теорія розповсюдження ультразвукових коливань застосована нами для аналізу механізму впливу УЗК на м'ясо для його тендеризації.

Процес тендеризації м'яса за допомогою УЗК можна здійснювати, коли м'ясо занурене в посолочний або маринадний розсіл, після обробки його можна використовувати для виробництва напівфабрикатів, солоних виробів, ковбас, копчених виробів, шинок та інших делікатесних виробів. Оскільки дія ультразвукових коливань на м'ясо призводить не лише до збільшення ніжності та покращення його консистенції, але й інтенсифікації процесів перерозподілу посолочних речовин в середину м'яса, за рахунок стискування і розширення м'язової тканини, що супроводжується виникненням змінного внутрішнього напруження, забезпечує інтенсивний фільтраційний перерозподіл розсолу системою пор та капілярів всередину м'яса.

Для отримання рівномірно ніжного м'яса рекомендується піддавати всі його сполучні тканини дії ультразвукових коливань, які мають достатню енергію, для руйнування цих тканин. Щоб досягти цієї мети, потрібно враховувати відмінності між видами м'яса, частоту коливань і положення м'яса щодо ультразвукового випромінювача. Взагалі, чим вище частота хвиль, тим менше глибина їх проникнення; тобто, за високої частоти енергія коливань розподіляється на короткі відстані у межах м'яса; а при нижчих частотах хвилі проникають глибше в м'ясо, перш ніж втратять енергію. Однією з основних перепон, які виникають під час застосування ультразвукових коливань для обробки м'яса є здатність м'яса як твердого тіла відбивати більшу частину хвиль стиснення або енергії від поверхні випромінювача до середовища, яке генерує ці хвилі. Відбиття звукової енергії від межі розділу двох середовищ – добре відоме явище.

Відношення енергії падаючого потоку до енергії, переданої в інше середовище, є функцією коефіцієнта питомого акустичного опору обох середовищ. Чим ближче коефіцієнт питомого акустичного опору до одиниці,

тим більше відношення переданої енергії до енергії падаючого потоку. Оскільки поверхня різних відрубів м'яса неоднакова і має геометрично неправильну форму, неможна забезпечити безперервний контакт між м'ясом і поверхнею випромінювача.

Традиційно, щоб зменшити втрати енергії в результаті відбиття, коли ультразвукові хвилі генеруються в середовищі, що не знаходиться в прямому контакті з м'ясом, застосовують проміжне середовище для безпосереднього зв'язку з випромінювачем ультразвукових коливань, яке повинно мати питомий акустичний опір, близький до опору м'яса, наприклад вода або розсіл.

За даними літературних джерел [85; 86] в більшості випадків м'ясо тендеризують під час обробки ультразвуковими хвилями протягом 1...30 хвилин. Під час цього процесу сполучні тканини м'яса можна зруйнувати швидкою зміною тиску незалежно від стану м'яса (парного, охолодженого або замороженого). Можна зруйнувати навіть окремі клітини м'яса, якщо необхідно. Ступінь розриву можна регулювати інтенсивністю ультразвукових коливань і тривалістю озвучування. Частота, інтенсивність і час озвучування визначається для кожного виду м'яса і відрубів експериментально. За даними літературних джерел [87; 88], існують апарати які використовують енергію ультразвукових коливань для обробки м'ясної сировини. Використання ультразвукових коливань високої інтенсивності випромінювання, їх механічна дія може викликати порушення структури клітини, їхнє ушкодження і зміну реологічних властивостей тканин, причому зі збільшенням інтенсивності ефект впливу зростає.

3.2. Розробка способу тендеризації за допомогою ультразвукових коливань м'яса з високим вмістом сполучної тканини

Під час аналізу літературних джерел встановлено, що існує спосіб для тендеризації ультразвуком замороженого м'яса [73]. У цьому способі УЗК передаються безпосередньо від випромінювача в оброблений зразок, для поліпшення контакту дослідного зразка з випромінювачем дослідний зразок притискається зверху вантажем, тому під час тендеризації відбувається різке збільшення температури м'яса та його термічна денатурація. Тому для запобігання денатурації дослідний зразок заморожується до стану моноліту, для зменшення дефростації, яка відбувається в дослідному зразку в наслідок поглинання, використовується примусова подача хладагенту (розсолу), який для збільшення тепловіддачі від дослідного зразка до розсолу, розсіл піддається барботуванню.

У запропонованому нами способі для запобігання вищезазначених

недоліків ультразвукові коливання передаються від випромінювача до проміжного середовища в якому розташовані дослідні зразки, при цьому на них діє не тільки енергія ультразвукової хвилі, але й кавітаційний тиск та ультразвукові кавітаційні мікропотоки, які виникають в процесі обробки УЗК. У запропонованому нами способі в об'ємі робочої камери не відбувається значного підвищення температури на протязі циклу за рахунок поглинання, тому примусове охолодження й барботування непотрібні.

Для реалізації цього способу була розроблена експериментальна установка (рис 3.1), яка містить генератор електричних коливань ультразвукової частоти, ультразвукову коливальну систему, що забезпечує перетворення електричної енергії у механічні ультразвукові коливання та їх введення за допомогою робочого органу – випромінювача 1 в оброблювану сировину, яка розташована в робочій камері циліндричної форми 3. Ультразвукова коливальна система складається з конічного концентратора 4, магнітострикційного перетворювача трансформаторного типу 5, відбивача 7, обмотки трансформатора. Монтується ультразвукова коливальна система в циліндричний корпус 6, за допомогою опорного кільця з отворами та болтів, оскільки вимагає примусового водяного охолодження, яке здійснюється через вхідний та вихідний патрубки.

Герметичність з'єднання з одного боку гарантує гумовий сальник, та конічна гумова прокладка із фігурною гайкою з другого боку, через які проходять дроти живлення обмотки перетворювача. Робоча камера 3 накручується на циліндричний корпус 6, за допомогою гайки, яка приварена до дна робочої камери. Через отвір у днищі робочої камери концентратор 4 та випромінювач 1 вводять пружні ультразвукові коливання у внутрішній об'єм робочої камери з проміжним середовищем, в якому на опорних кутиках, розташований сітчастий кошик 2, в ньому розташовано експериментальні зразки. Робоча камера в свою чергу за допомогою трьох вертикальних опор з'єднується з станиною.

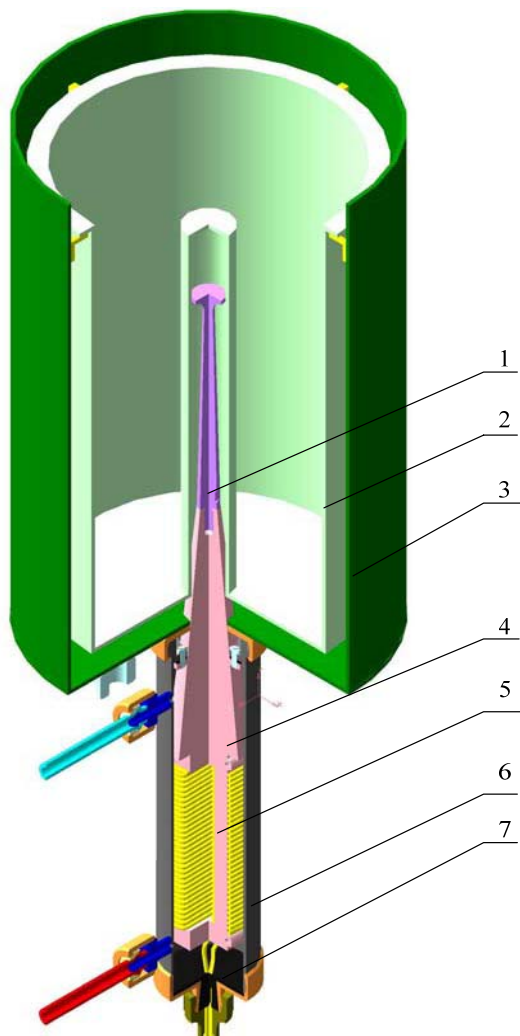


Рис. 3.1. Конструктивна схема експериментальної установки:
 1 – випромінювач; 2 – сітчастий кошик; 3 – робоча камера циліндричної форми; 4 – конічний концентратор; 5 – магнітострикційний перетворювач трансформаторного типу; 6 – циліндричний корпус УЗКС; 7 – відбивач

Принцип дії установки полягає в наступному – при підключенні генератора ультразвукових коливань до електричної мережі, на обмотку трансформатора перетворювача подається живлення з частотою 22 кГц. У магнітострикційному перетворювачі відбувається перетворення енергії електричних коливань, в енергію механічних коливань трансформатора, які підсилює концентратор. Випромінювач передає пружні ультразвукові коливання до проміжного середовища широким фронтом хвилі.

Невдовзі над торцем випромінювача виникає зона кавітації. При виникненні кавітації у воді створюються зони тиску і розрядження, у воді тиск передається рівномірно та одночасно на всі сторони. УЗК при поширенні у воді відбиваються від стінок сітчастого кошика, стінок циліндричного корпусу та від поверхні води (межа поділу фаз вода - повітря) практично повністю, та поглинається середовищем та дослідними зразками. За цих умов у проміжному середовищі виникають ультразвукові мікропотоки, які на межі поділу фаз вода-тверде тіло (шматки м'яса) інтенсифікують масообмінні процеси, шляхом зміни проникливості оболонок клітин білків сполучної тканини. Із вище сказаного можна зробити висновок що збільшення ніжності м'яса тендеризованого за допомогою УЗК пояснюється дією на нього знакоперемінного ультразвукового тиску, поглинанням ультразвукової енергії, дією ультразвукових мікропотоків, (додаток А).

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

4.1. Обґрунтування та вибір частоти випромінювання

Для дослідження процесу тендеризації м'яса за допомогою УЗК, використовували експериментальну установку напівперіодичної дії, розробленої на базі ультразвукового генератора УЗГ – 2М, адаптованого до умов даного експерименту (рис. 4.1).

Принцип дії апарата полягає в наступному – у разі підключення генератора ультразвукових коливань до електричної мережі, на обмотку трансформатора перетворювача подається живлення з частотою 15, 22, 35 кГц. У магнітострикційному перетворювачі відбувається перетворення електричної енергії, в енергію механічних коливань трансформатора, які підсилює концентратор. Випромінювач передає пружні ультразвукові коливання в рідину широким фронтом хвилі.

Таблиця 4.1

Акустичні характеристики м'ясної сировини відносно параметрів води

Середовище	Швидкість звуку, м/с	Густина, кг/м ³	Акустичний імпеданс відносно води
Вода (за t = 20°C)	1482	1000	1
Жирова тканина	1350 ... 1470	950	0,86 ... 0,94
Кров	1540 ... 1600	1040	1,04 ... 1,08
Сполучна тканина	1560 ... 1620	1070	1,13 ... 1,18
М'язова тканина	1540	1060	1,11

Рідина обирається таким чином, щоб її акустичний імпеданс наближався до акустичного імпедансу м'яса (табл.4.1), яке розміщується в цій рідині. Після подачі живлення, над торцем випромінювача виникає зона кавітації. Під час проведення експериментів випромінювач 4 (рис. 4.1) заміняли на змінні робочі органи розроблені для експериментів (рис. 4.2).

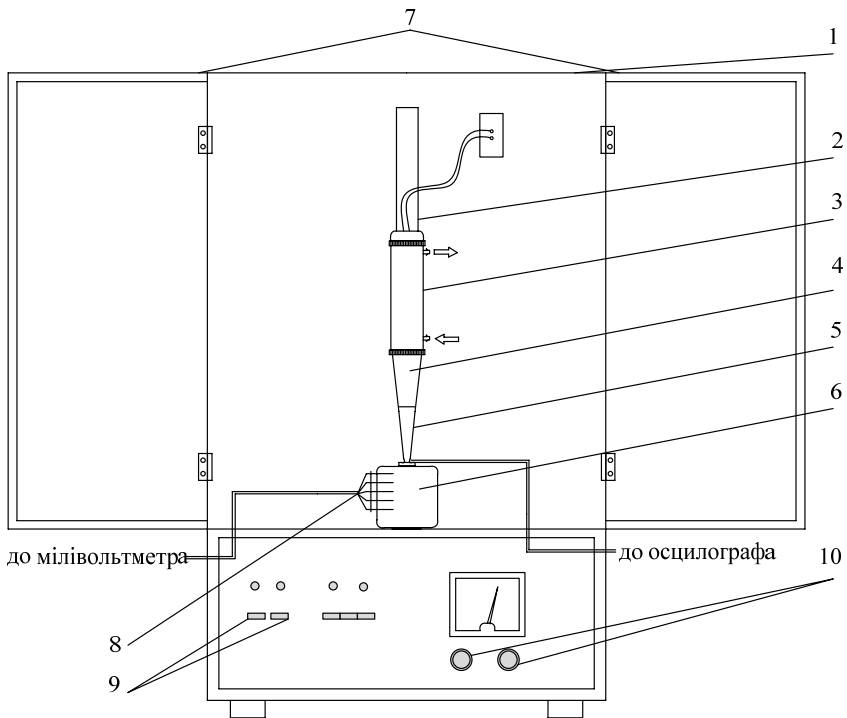


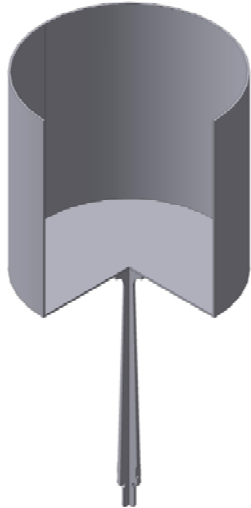
Рис. 4.1. Схема експериментальної установки: 1 – корпус; 2 – штатив; 3 – трансформатор з водяним охолодженням; 4 – концентратор; 5 – випромінювач; 6 – дослідний зразок; 7 – звукоізолюючі дверцята; 8 – термопари; 9 – імпульсний перемикач та перемикач частоти; 10 – регулятори частоти та потужності



конічний, з широким дном



конічний, з вузьким дном



циліндричний



циліндричний основний

Рис. 4.2. Види робочих органів, що досліджувалися

Під час виникнення кавітації у рідині створюються зони тиску і розрядження, оскільки у рідині тиск передається рівномірно та одночасно на всі боки. УЗК при поширенні у рідині відбиваються від стінок сітчастого кошика, стінок циліндричного корпусу та від поверхні рідини (межа поділу фаз «рідина – повітря») практично повністю, та поглинається середовищем та дослідними зразками. За цих умов у середовищі виникають ультразвукові мікропотоки, які на межі поділу фаз «рідина-тверде тіло» (шматки м'яса) інтенсифікують масообмінні процеси, шляхом зміни проникливості оболонок клітин білків сполучної тканини.

Одним із основних способів визначення вихідних параметрів ультразвукової коливальної системи є вимірювання амплітуди механічних коливань робочого торця ультразвукового випромінювача. Найбільш простим є метод, заснований на вимірі амплітуди коливань за допомогою мікроскопа з окулярною шкалою або сіткою. При цьому на робочий торець концентратора потрібно нанести контрольну риску та увімкнути установку. В окулярі мікроскопа можна спостерігати «розмиття» контрольної риски. Величина цього розмиття відповідає «розмаху» коливань, тобто подвоєному значенню амплітуди. Дослідити вихідні параметри УЗКС прямими методами дуже складно, оскільки вони залежать від зовнішніх чинників. Проте майже всі параметри УЗКС можна описати та розрахувати за формулами, що наведені у розділі 2 [89].

На даний час існують методики розрахунку вихідних параметрів ультразвукових коливальних систем, які дозволяють одержати лише приблизні параметри окремих конструктивних елементів [90; 91].

Крім того, використання емпіричних формул із залученням експериментальних результатів є досить складним і вимагає громіздких обчислень та витрат часу. Вимірювання акустичної потужності ультразвукових технологічних установок є невід'ємним і важливим етапом на стадії початкового налаштування ультразвукової апаратури і в процесі УЗ обробки різних технологічних середовищ. Для налаштування ультразвукових коливальних систем під конкретний технологічний процес величина акустичної потужності повинна бути строго витримана в певних межах, оскільки величина акустичної потужності, яка вводиться в середовище, є основним параметром УЗ установок і визначає якість і ступінь протікання технологічного процесу в ультразвуковому полі [92].

Відомо, що значну частку існуючих УЗ технологій складають технологічні процеси, що протікають у рідких і рідкодисперсних середовищах. Найчастіше для вимірювання корисної акустичної потужності ультразвукових установок, призначених для роботи в рідких і рідкодисперсних середовищах, використовують калориметричний метод

[93]. Методика проведення вимірювань заснована на практичній реалізації калориметричного методу, стандартизованого Міжнародною електротехнічною комісією [94], яка полягає в непрямому оцінюванні по ступеню нагрівання $\Delta T = t_2 - t_1$ рідини в об'ємі V з адіабатною або ізотермічною оболонкою, з відомою теплоємністю ΔC і густиною $\Delta \rho$, оскільки ці параметри у рідині під час нагрівання змінюються, за формулою

$$P_{\text{ак}} = \Delta C \cdot \Delta \rho \cdot V \cdot \frac{\Delta T}{t}, \quad (4.1)$$

де t – тривалість озвучення рідини, яка знаходиться у вимірювальному об'ємі, с;

ΔC – теплоємність рідини, кДж/кг·К;

$\Delta \rho$ – густина рідини, кг/м³;

V – об'єм рідини, м³.

У лабораторних умовах, вимірювання здійснюють за допомогою термометра з високою чутливістю і секундоміра у вимірювальному об'ємі з адіабатною або ізотермічною оболонкою. Спочатку рееструється початкова температура рідини t_1 , потім ультразвуковий випромінювач занурюється у вимірювальний об'єм і проводиться озвучування середовища тривалістю t у вимірювальному об'ємі. У результаті того, що вся акустична енергія переходить у теплову, за умов відсутності теплообміну з навколишнім середовищем, вимірювання кінцевої температури t_2 дозволяє обчислити величину акустичної потужності за формулою (4.1).

Використання калориметричного методу для визначення корисної акустичної потужності під час налаштування ультразвукових установок має ряд недоліків, а саме:

- невисока швидкість визначення потужності (більше 30 секунд);
- використання інерційних датчиків температури - термопар;
- відсутність будь-якої автоматизації, що збільшує похибку і зменшує точність налаштування УЗ апаратів.

З метою усунення вище зазначених недоліків було розроблено установку, що дозволяє в автоматичному режимі рееструвати і відобразити на дисплеї поглинену у вимірювальному об'ємі величину акустичної потужності та за допомогою АЦП (аналогово-цифрового перетворювача) і комп'ютера записувати отримані дані в файл (рис. 4.3).

Традиційно в наукових дослідженнях використовують термопари та металеві терморезистори (термометри опору). Проте останнім часом ді

вимірювання температур у діапазоні від -50°C до $+150^{\circ}\text{C}$ все ширше застосують напівпровідникові датчики, в яких використовують температурну зміну властивостей PN-переходів. Перевагою таких датчиків є те, що вони виготовляються за технологією інтегральних мікросхем, що дозволяє розмістити в одному кристалі як сам датчик, так і електроніку, що проводить обробку сигналу, включаючи аналого-цифровий перетворювач і інтерфейсну частину. Конструктивно датчик оформлений в корпусі малогабаритного транзистора (ТО92), в описі датчика зазначено, що його похибка не перевищує $0,5^{\circ}\text{C}$ в діапазоні від -55 до $+125^{\circ}\text{C}$. Датчик за допомогою монтажного проводу з'єднується з роз'ємом RS – 232, який співпадає з послідовним комп'ютерним портом COM 1.

У тканинах із надто вираженою неоднорідністю спостерігається підвищене розсіювання енергії звукової хвилі. Залежність між коефіцієнтом поглинання ультразвуку в тканині і його частотою, що наближається до лінійного; це пояснюється механізмом в'язкого згасання, який зумовлений в'язкими зв'язками між частками або елементами структури тканини. Ці передумови і лягли в основу постановки експерименту [95; 96].

Експеримент проводився за умови безпосереднього контакту дослідного зразка з випромінювачем (рис. 4.4), бо попередні експерименти показали, що на межі випромінювач – повітря та повітря – м'ясо втрачається близько 90 % ультразвукової енергії.

Попередньо було проведено експеримент, за якого дослідний зразок піддавався озвученню ультразвуком частотами 15, 22, 35 кГц протягом 30 хвилин вздовж волокон м'язів. Вимірювання температури нагрівання зразків м'яса проводилася за допомогою термопар. Для цього, було розроблено гребінку з 5 хромель-копелевих термопар для реєстрації нагрівання у разі озвучення зразка ультразвуком. Термо-ЕРС з вільних кінців термопари знімали за допомогою точкового самописця «ЭПП-9».

Розрахунок енергії, випромінює випромінювач визначали наступним чином

$$E_{\text{вип}} = (1/2)\rho(2\pi f)^2 A^2 V_{\text{рк}}, \quad (4.2)$$

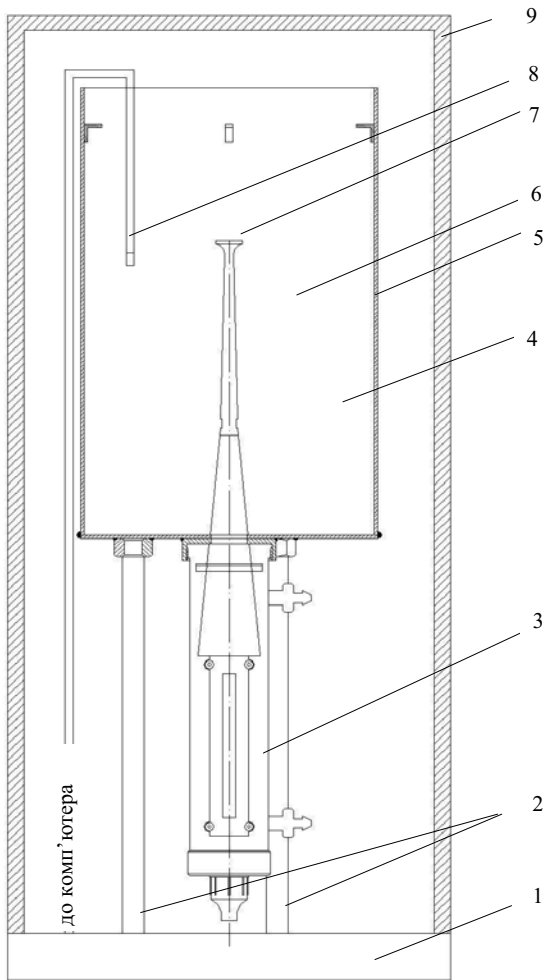


Рис. 4.3. Установка для вимірювання корисної акустичної потужності: 1 – станина; 2 – опори; 3 – ультразвуковий трансформатор із водяним охолодженням; 4 – випромінювач; 5 – робоча камера; 6 – рідина (вода); 7 – концентратор; 8 – температурний датчик; 9 – адіабатна оболонка.

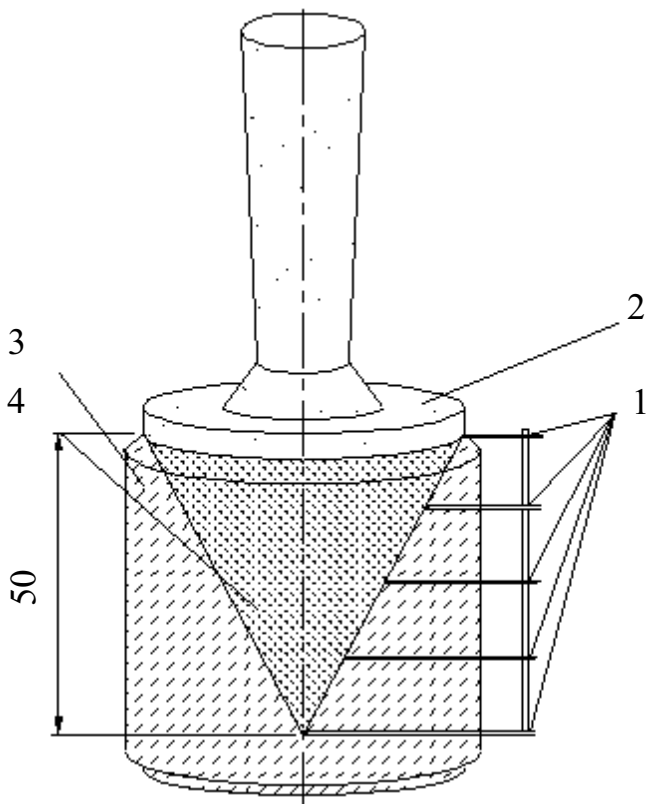


Рис. 4.4. Схема випромінювання ультразвукових коливань у дослідний зразок: 1 – гребінка з термопарами; 2 – випромінювач; 3 – дослідний зразок; 4 – фокальний пучок.

де $E_{\text{вип}}$ – енергія випромінювача, Дж/м³;

ρ – густина середовища, кг/м³;

f – частота випромінювача, Гц;

A – амплітуда коливань торця випромінювача випромінювача, м;

$V_{\text{рк}}$ – об'єм робочої камери, м³.

Кількість енергії, яку випромінює перетворювач за одиницю часу, величина постійна, та дорівнює 149,4 кДж. Середньооб'ємну температуру з 5 термопар визначали наступним чином

$$t_v(\tau) = \frac{1}{V_{зр}} \left(\sum_{i=1}^n V_i \cdot t_i(\tau) \right), \quad (4.3)$$

де V_i – об'єм, в якому розташовувалася i -та термопара, m^3 ;

t_i – апроксимація сигналу, отриманого з i -тої термопари;

$V_{зр}$ – загальний об'єм зразка, m^3 ;

t_v – середньооб'ємна температура, $^{\circ}C$.

Кількість енергії, яка розсіялася в зразках м'яса визначалася наступним чином

$$\Delta E = c_m \rho_m V_{зр} \Delta t_v \quad (4.4)$$

де ΔE – кількість теплоти, яка необхідна об'єкту, для того, щоб його температура збільшилася на Δt , Дж/ m^3 ;

c_m – теплоємність м'яса, Дж /кг К;

ρ_m – густина м'яса, кг/ m^3 ;

f – частота випромінювача, кГц;

A – амплітуда коливань торця випромінювача, м;

V – об'єм зразка, m^3 .

Акустичні процеси тісно пов'язані з тим середовищем, у якому поширюється ультразвукової хвилі. Хід цих процесів залежить від типу середовища, та його акустичних властивостей, наприклад, швидкості звуку в ньому, яка залежить від густини та пружних властивостей середовища, питомого хвильового опору і коефіцієнта загасання звуку.

Колівальні рухи передаються від концентратора в середовище, в якому вони розповсюджуються у вигляді областей стискання та розрядження, які прямують один за одним. У густому середовищі коливання розповсюджуються повільніше, ніж у менш густому. Звукові хвилі поширюються у вигляді спрямованих променів прямолінійно лише в тому випадку, якщо довжина хвилі незначна у порівнянні з радіусом випромінювача.

Дослідження проводилися на зразку циліндричної форми в робочій насадці циліндричної форми (рис. 4.5). Характер проходження ультразвукової хвилі крізь межу розподілу двох середовищ залежить від властивостей цих середовищ і від кута поширення хвилі до поверхні їхнього розділу.

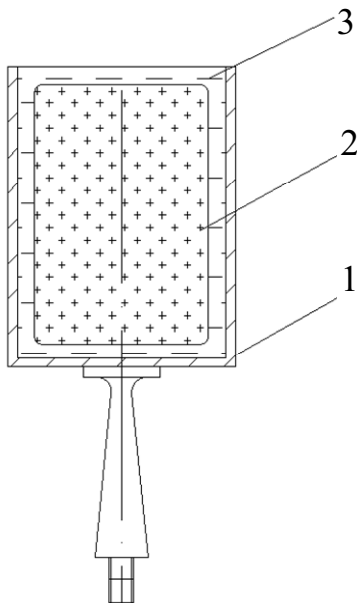


Рис. 4.5. Насадка з проміжним середовищем: 1 – робочий орган із циліндричною насадкою; 2 – випробуваний зразок; 3 – проміжне середовище.

Для підвищення корисної дії дослідний зразок занурювався в рідину (збільшення поглинання, зменшення відбиття) під час озвучування широким фронтом ультразвукової хвилі.

Під час обробки м'яса ультразвуковими коливаннями в проміжному середовищі температура поверхні зразка змінюється наступним чином. Спочатку енергія ультразвукової хвилі подається в проміжне середовище – рідину. Енергія підведеної енергії ультразвукової хвилі частково поглинається, частково пропускається, частково відбивається.

Величину поглинутої енергії УЗ хвилі можна оцінити за швидкістю нагрівання дослідного зразка в рідині, що озвучується. Для визначення величини поглинутої енергії потрібно знайти середньооб'ємну температуру зразка. Середньооб'ємна температура визначається наступним чином

$$V_{\text{ср.об.}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot T_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (4.5)$$

де $V_{\text{ср.об.}}$ – середньооб'ємна температура, м³;
 V_i – об'єм, у якому перебуває i -та термопара, м³;
 T_i – температура, яку показує i -та термопара, °С;
 n – кількість термопар у зразку.

Оскільки зміна температури різних шарів у процесі обробки неоднакова, то для визначення температурного впливу на зразок необхідно визначити середньооб'ємну температуру. Далі за допомогою програми, що написана в MathCad (додаток Б), було розраховано середньооб'ємну температуру.

З метою обґрунтування вибору частоти випромінювання, використовувались три серійними випромінювача з частотою 15, 22, 35 кГц, та досліджувався їх вплив на процес тендеризації м'яса за допомогою УЗК з використанням експериментальної установки описаної у підрозділі 3.2. Для вирішення цього завдання були проведені теоретичні (розділ 2) та експериментальні дослідження за стандартними методиками МЕК, (підрозділи 3.3.1., 3.3.2.). Результати розрахунків та досліджень основних енергетичних параметрів УЗКС наведені в табл. 4.2 та рис. 4.11 [97; 98]. На рис. 4.11. наведено результати перевірки трьох ультразвукових випромінювачів за методикою, яка заснована на практичній реалізації калориметричного методу стандартизованого МЕК, та полягає в непряму оцінюванні за ступенем нагрівання $\Delta T = t_2 - t_1$ рідини в об'ємі V з адіабатною або ізотермічною оболонкою, з відомою теплоємністю ΔC і густиною $\Delta \rho$. Сутність метода полягає у тому, що під час ультразвукової обробки температура середовища, в яке відбувається випромінювання, зростає.

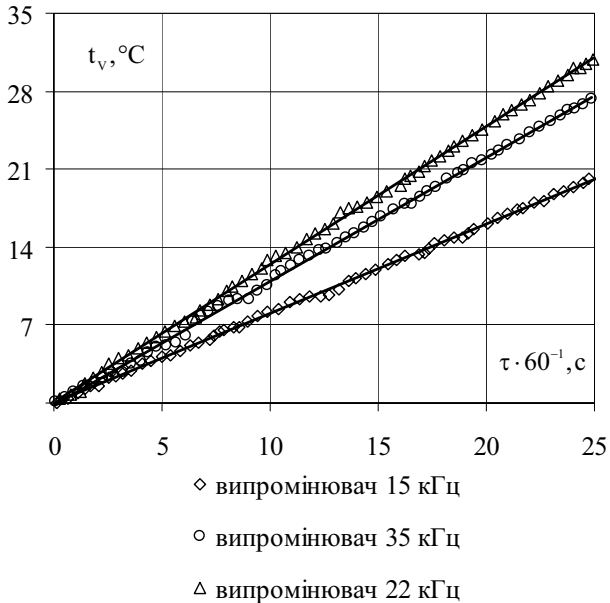


Рис. 4.6. Залежність середньооб'ємної температури від тривалості обробки

При чому чим довше та більше в це середовище подається енергія УЗК, тим вища його температура. Із даних, зображених на рис. 4.6, видно, що УЗ випромінювач частотою 22 кГц, має найкращі енергетичні показники, оскільки величина середньооб'ємної температури за тієї ж тривалості обробки у нього більша. Це підтверджується даними табл. 4.2, за якими амплітуда звуку часток та корисна акустична потужність джерела звуку у нього найбільша. Тому випромінювач частотою 22 кГц було визнано найефективнішим для проведення тендеризації м'яса за допомогою УЗК.

Основні параметри УЗКС

Показники	Величина	15 кГц	22 кГц	35 кГц
Амплітуда зсуву часток, 10^{-6} м	A	30	70	50
Довжина хвилі, м	λ	0,102	0,07	0,044
Амплітуда коливальної швидкості, м/с	U	2,82	9,67	10,99
Максимальна амплітуда прискорення, 10^6 м/с ²	B	-0,26	-1,34	-2,41
Середня кінетична енергія в одиниці об'єму, 10^4 Дж/м ³	E_k	0,21	2,43	3,14
Густина енергії звукової хвилі в одиниці об'єму, 10^4 Дж/м ³	\bar{E}	0,41	4,87	6,28
Сила звуку, 10^{-9} Вт/м ²	F	38,8	3,31	2,56
Акустична потужність джерела звуку, 10^{-13} Вт	$E_{\text{вип}\Sigma}$	68,5	5,85	4,53
Тиск звукової хвилі, 10^7 кгс/см ²	D	2,48	1,56	2,48
Акустична твердість середовища, 10^{11}	$Q_{A.T.}$	1,51	2,23	3,54
Тиск звуку на перешкоду, кг/см ²	\bar{S}	87	102	132
Коефіцієнт поглинання сумарний, 10^3	2α	2,025	4,36	11,03
Коефіцієнт поглинання зумовлений в'язкістю (рівняння Стокса), 10^3	α_1	2,025	4,356	11,03
Коефіцієнт поглинання зумовлений теплопровідністю (рівняння Кірхгофа), 10^{-4}	α_2	4,5	6,6	10,5
Корисна акустична потужність джерела звуку, Вт	$P_{\text{ак}}$	51	78	68

Коефіцієнти пропускання k_D , відбиття k_Γ , акустичний опір середовища R_A не залежать від частоти випромінювання, а лише від швидкості звуку та густини середовища [99; 100], $k_D = 0,93$, $k_\Gamma = 0,06$, $R_A = 1,61 \cdot 10^6$ кг·м⁻²·с⁻¹.

Наступним завданням було визначення способу підведення УЗ енергії до оброблюваних зразків кількості енергії, яка при цьому розсіялася та визначення розподілу УЗ енергії усередині робочої камери УЗ апарата. Для вирішення цього завдання були проведені теоретичні та експериментальні дослідження, описані результати яких наведено на рис. 4.7 та рис. 4.8.

Для вимірювання температури всередині зразків м'яса була виготовлена гребінка з 5 термопарами. Перший експеримент, (рис. 4.7, а) відбувся за умови відсутності контакту УЗ випромінювача та досліджуваного зразка. Під час проведення експерименту середньооб'ємна температура зразка незначно на 2°C змінилася. Це відбулося за рахунок теплопередачі від навколишнього середовища. Структура зразка на поперечному перерізі не змінилася. Другий експеримент, (рис. 4.7, б) відбувся за умову прямого контакту УЗ випромінювача та зразка, що досліджується.

Під час проведення експерименту середньооб'ємна температура зразка стрімко збільшувалася та протягом 12 хвилин досягла 100°C . Це відбулося за рахунок активного розсіяння УЗ енергії в зразку м'яса. Структура зразка на поперечному перерізі змінилася – на поверхні зразка відразу було помітно фокальну пляму, яка була розташована безпосередньо під випромінювачем – м'ясо частково денатурувало та змінило свій колір із червоного на біло-сірий. Цей ефект було помітно також в глибині м'яса (приблизно 5 см). Фокальний пучок, межу якого було помітно за зміною кольору м'яса, мав конічну форму. Третій експеримент (рис. 4.7 в), відбувся за умови контакту УЗ випромінювача та зразка, що досліджується, крізь середовище, акустичний опір якого наближається до акустичного опору м'яса (вода). Під час проведення експерименту середньооб'ємна температура зразка зростала помірно – за час проведення експерименту вона збільшилася від 5 до 37°C . Це відбулося за рахунок розсіяння УЗ енергії в об'ємі рідини із зразком м'яса. Структура зразка на поперечному перерізі змінилася, м'язові волокна (міофібрили) набрякли, сарколемна оболонка міофібрил місцями зруйнувалася, можна спостерігати часткове розділення м'язових волокон.

На рис. 4.8 можна побачити, що для процесу тендеризації м'яса за допомогою УЗК краще використовувати проміжне середовище, акустичний імпеданс якого наближається до акустичного імпедансу м'яса.

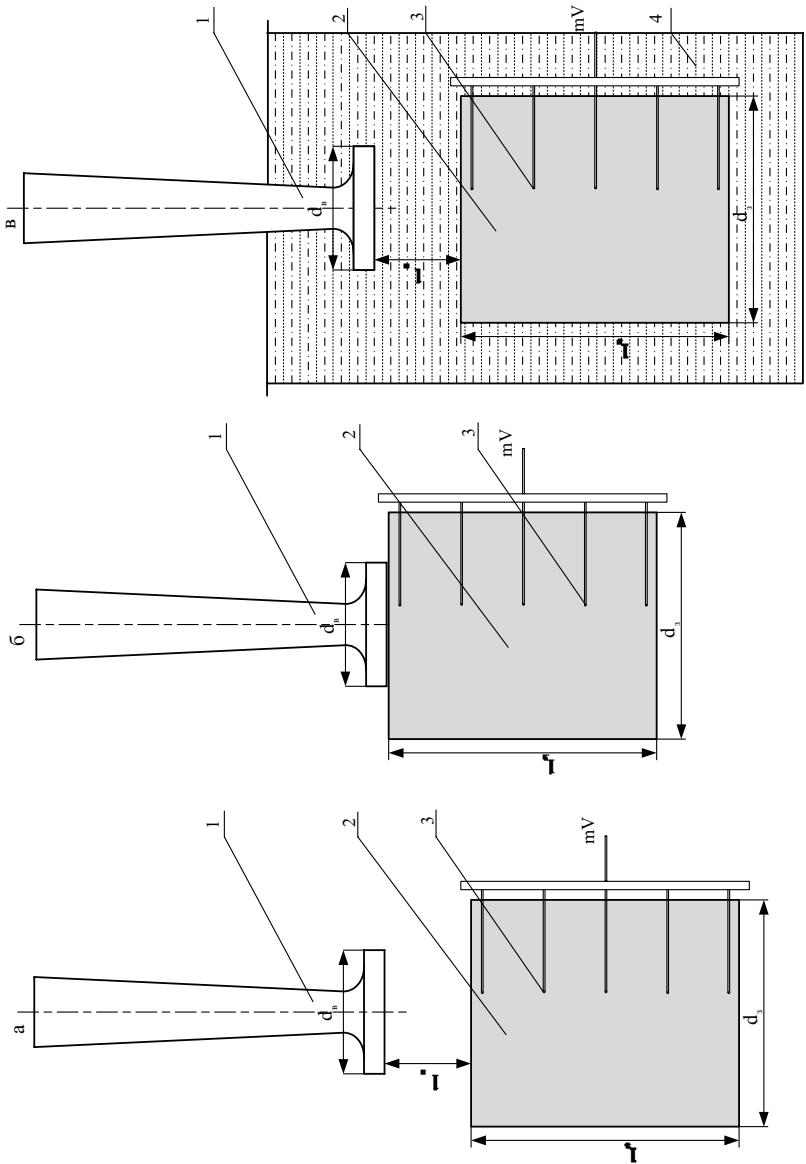


Рис. 4.7. Способи випромінювання: 1 – випромінювач; 2 – дослідний зразок; 3 – гребінка з термопарами; 4 – рідина.

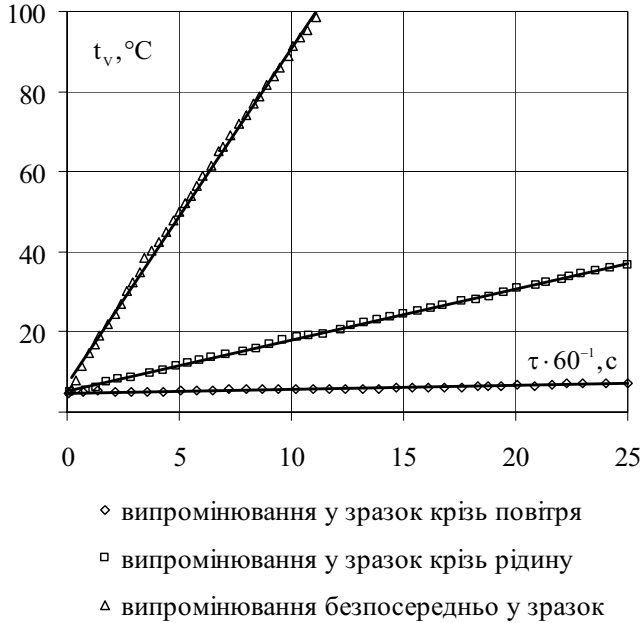


Рис 4.8. Залежність середньооб'ємної температури м'яса від тривалості обробки

Оскільки протягом експерименту температура в середині зразка піднялася до 37°C , що нижче температури денатурації білків, це дозволяє зробити висновок, що тендеризація м'яса, шляхом часткової дезагрегації колагену з'єднувальної тканини відбувається лише за рахунок механічного впливу УЗК.

Для визначення розподілення енергії у м'ясі в об'ємі робочої камери під час випромінювання широким фронтом плоскої хвилі на відстані $l_{\text{в}} = 1,5\text{d}$, шляхом терморозподілення температури за об'ємом зразка м'яса було проведено дослідження результати якого наведено на рис. 4.9 [101; 102].

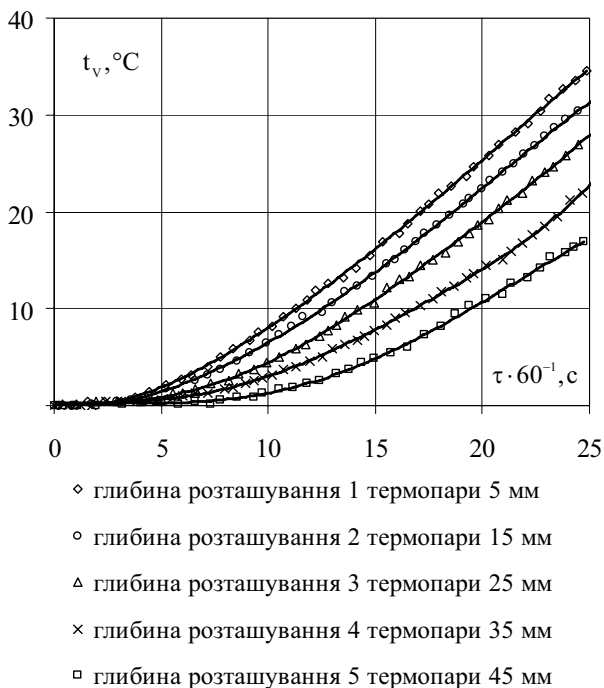


Рис 4.9. Розподілення температури в зразках м'яса під час УЗ обробки

Із аналізу даних, що наведені на рис. 4.9, можна зробити висновок, що розсіяння УЗ енергії найкраще відбувається в поверхневих шарах м'яса.

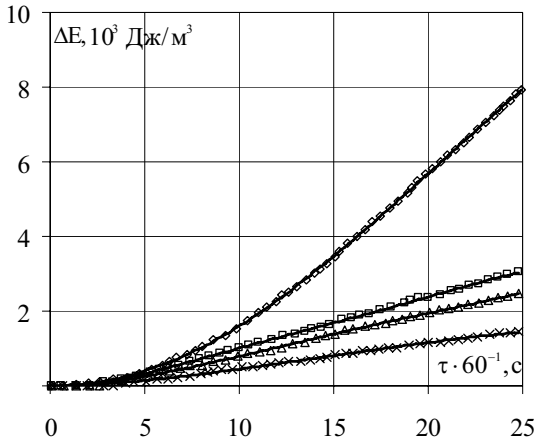
Це явище призводить до підвищення температури, із збільшенням глибини розташування термопар температура зменшується, що свідчить про затухання енергії хвилі, на відстані $\lambda/2$ енергія хвилі зменшується на половину а на відстані λ повністю затухає. Для ультразвукового випромінювача частотою 22 кГц довжина хвилі $\lambda = 0,07$ м, табл. 4.2. Тобто можна зробити висновок, що геометричний розмір зразків м'яса не повинен перевищувати $2d$ випромінювача, та має бути висотою не більшою ніж 5 см.

4.2. Дослідження робочих органів випромінювачів

З метою перевірки та підтвердження розрахованих теоретично параметрів робочих органів ультразвукової магнітострикційної коливальної системи були виготовлені робочі органи (рис. 4.2) наступних форм:

- конічна з вузьким дном;
- конічна з широким дном;
- циліндрична;
- циліндрична основна з підведенням випромінювача в середину робочої камери.

Дослідженню підлягали робочі органи, (рис. 4.2) за величиною поглинутої акустичної енергії. Величину поглинутої акустичної енергії знаходили як середньооб'ємну температуру зразків (рис. 4.10).



- ◇ циліндричний, з внутрішнім розташуванням випромінювача
- циліндричний робочий орган
- △ конічний, з вузьким дном робочий орган
- × конічний, з широким дном робочий орган

Рис. 4.10. Залежність середньооб'ємної температури зразків від форми робочого органу та тривалості озвучування

Як можна побачити з графіка найбільшу величину акустичної енергії, що була поглинута у воді модельним тілом, демонструє циліндрична основна насадка. Це відбувається тому, що енергія ультразвукової хвилі завдяки конструкції випромінювача потрапляє безпосередньо до внутрішнього об'єму робочої камери.

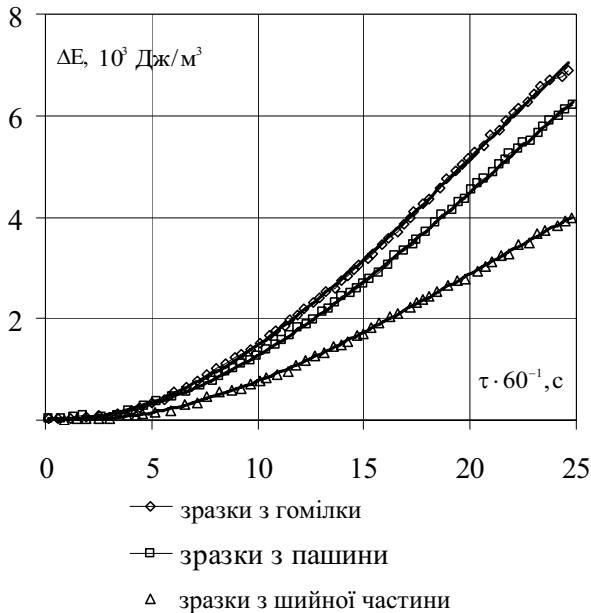


Рис. 4.11 Залежність розсіяння енергії ультразвукових коливань під час обробки м'ясної сировини

З метою визначення загальної енергії ультразвукової хвилі та кількості енергії ультразвукової хвилі, що розсіялась під час процесу ультразвукової обробки різних видів м'ясної сировини, були проведені дослідження з визначення цих величин. Як видно з отриманих результатів (рис.4.11) енергія, що розсіюється на зразках різних видів м'ясної сировини, зі збільшенням тривалості ультразвукової обробки збільшується за умови постійного підведення енергії. Причому розсіяння на зразках із гомілки більше, ніж на зразках з пащини, а розсіяння на зразках із пащини більше ніж на зразках із шийної частини. Тобто розсіяння енергії ультразвукових

коливань відбувається більше в тих зразках м'ясної сировини, де з'єднувальної тканини більше. Пояснюється отриманий результат наступним чином. Ступінь нагрівання м'ясної і жирової тканини зумовлений характером поглинання, інтенсивністю і частотою ультразвуку. Внаслідок неоднорідності структури м'язової тканини поглинання в ній більше, ніж у шарі жиру.

З цього можна зробити висновок, що оскільки зразки з о шийної частини містять більше жирової тканини, ніж зразки з пащини та гомілки, то розсіяння ультразвукової енергії на них менше у порівнянні з іншими зразками. Максимальне розсіяння ультразвукової енергії у порівнянні з іншими досліджуваними зразками відбувається на зразку з гомілки, оскільки вона містить найбільшу кількість з'єднувальної тканини [103; 104].

4.3. Математичне моделювання процесу тендеризації за допомогою ультразвуку

Метою досліджень було визначення впливу на ефективність процесу тендеризації частоти, об'єму робочої камери, маси шматочків м'яса, тривалості процесу. Ефективність процесу тендеризації розглядали як змїну величин: прийнятї роботи різання й сили різання [105; 106]. Дослідження були проведені на експериментальній установці, будова та принцип дії якої описано у підрозділі 3.2.

Було отримане рівняння регресії (4.5) в кодованих величинах, за якого кожна змінна змінюється від -1 до +1, що описують роботу різання та силу різання тендеризованого м'яса [107; 108].

$$y(x_1, x_2, x_3) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3 \quad (4.5)$$

де x_1 – частота f , кГц;

x_2 – об'єм робочої камери V , м³;

x_3 – маса шматочків м'яса m , кг;

x_4 – тривалість процесу τ , хв;

y – робота різання $A_{\text{різ}}$, кДж; $F_{\text{різ}}$, Н.

Методом найшвидшого спуска визначаємо умови проведення подальших експериментів, для одержання раціональних параметрів процесу. Дослід проводився на 0 рівні факторів, наступні розраховувались за рівнянням регресії. Для визначення коефіцієнтів при факторах і коефіцієнтів

парної взаємодії був проведений дробовий факторний експеримент $2^{(3-1)}$. План дробового факторного експерименту $2^{(3-1)}$ наведено у табл. 4.3 та значення отриманих коефіцієнтів у табл. 4.4.

Таблиця 4.3

План дробового факторного експерименту $2^{(4-1)}$

№ досліджу	V (x ₁)	m (x ₂)	τ (x ₃)	F _{різ} (y)	A _{різ} (y)
1	-	-	-	58	1,9
2	-	-	+	32	1,0
3	-	+	-	50	1,6
4	-	+	+	40	1,2
5	+	-	-	58	1,8
6	+	-	+	36	1,1
7	+	+	-	70	2,2
8	+	+	+	37	1,3

Таблиця 4.4

Значення отриманих коефіцієнтів

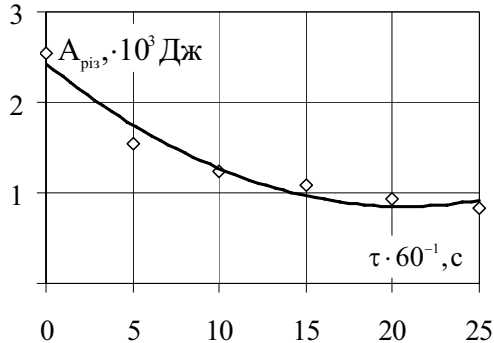
Коефіцієнти	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₁₂	a ₁₃	a ₂₃	a ₁₂₃
Значення коефіцієнтів, A _{різ}	1,53	0,09	0,63	-0,36	0,09	-0,04	0,04	-0,09
Значення коефіцієнтів, F _{різ}	47,63	2,63	1,63	-11,38	1,63	-2,38	0,63	-3,38

На основі отриманих значень визначаються умови проведення експерименту з визначення раціональних параметрів процесу щодо роботи різання і сили різання, табл. 4.5 та табл. 4.6 відповідно.

Таблиця 4.5

Умови проведення експерименту стосовно $A_{\text{різ}}$

№ дослідю	$V, \text{ м}^3$	$m, \text{ кг}$	$\tau, 60^{-1}, \text{ с}$	$A_{\text{різ}}, \text{ кДж}$
1	$3 \cdot 10^{-3}$	0,15	15	1
2	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,14	20	0,9
3	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,13	25	0,8

Рис. 4.12. Зміна роботи $A_{\text{різ}}$ зразків із гомілки в залежності від тривалості УЗ-обробки

Таблиця 4.6

Умови проведення експерименту стосовно $F_{\text{різ}}$

№ дослідю	$V, \text{ м}^3$	$m, \text{ кг}$	$\tau, 60^{-1}, \text{ с}$	$F_{\text{різ}}, \text{ Н}$
1	$3 \cdot 10^{-3}$	0,15	15	32
2	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,14	20	30
3	$2,6 \cdot 10^{-3}$	0,14	25	28

В результаті проведених досліджень отримано рівняння, що дозволяє описати процес тендеризації м'яса за допомогою УЗК відносно роботи та сили різання рис. 4.12, 4.13:

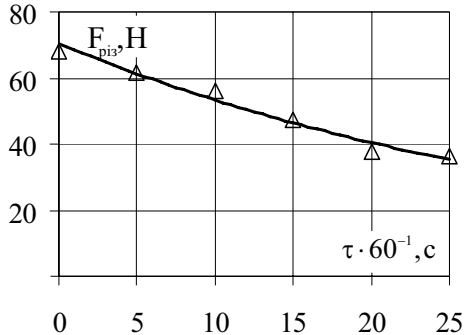


Рис. 4.13. Зміна сили різання $F_{різ}$ зразків із гомілки в залежності від тривалості УЗ-обробки

$$A_{різ}(\tau) = 0,72 + 1,84 \cdot e^{-0,112\tau}, \quad (4.6)$$

$$F_{різ}(\tau) = -18,76 + 89,96 \cdot e^{-0,018\tau}. \quad (4.7)$$

Як видно з отриманих даних на рис. 3.7, за мінімального значення роботи різання і сили різання визначені раціональні умови для проведення процесу. Виходячи з отриманих даних об'єм робочої камери й масу м'яса раціонально буде закріпити на рівні $3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ і 150 г, та проводити подальші дослідження для встановлення залежності роботи різання і сили різання від тривалості УЗ-обробки.

Одним із важливих параметрів, що може впливати на ефективність процесу тендеризації м'яса за допомогою УЗК, є коефіцієнт завантаження робочої камери k_3

$$k_3 = \frac{V_M}{V}, \quad (4.8)$$

де V_M – об'єм м'яса, що підлягає тендеризації, м^3 ;

V – об'єм робочої камери, в якій відбувається тендеризація, м^3 .

Результати досліджень залежності коефіцієнту завантаження робочої камери від роботи різання та об'єму робочої камери наведено на рис. 4.14, 4.15.

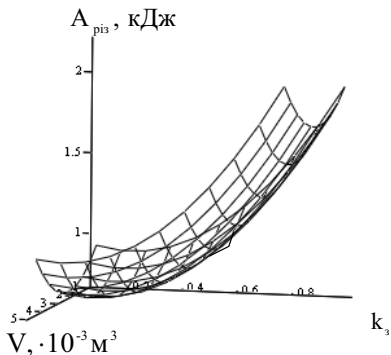


Рис. 4.14. Залежності коефіцієнту завантаження робочої камери від об'єму робочої камери та роботи різання

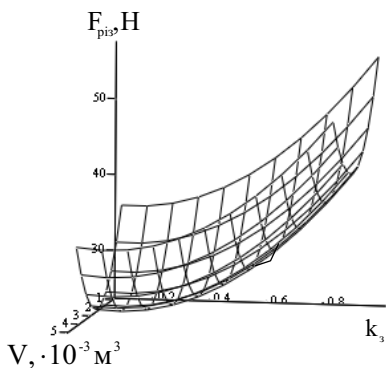


Рис. 4.15. Залежності коефіцієнту завантаження робочої камери від об'єму робочої камери та сили різання

Із вище викладеного можна зробити висновок, що для процесу тендеризації м'яса за допомогою УЗК ефективними є параметри: коефіцієнт завантаження робочої камери $k_3 \leq 0,7$; частота $f = 22 \text{ кГц}$; тривалість процесу $\tau, 15 \cdot 60^{-1}, \text{ с}$; об'єм робочої камери $V=3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; маса шматочків м'яса $m=0,15 \text{ кг}$.

РОЗДІЛ 5 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕНДЕРИЗОВАНОГО М'ЯСА

5.1. Результати дослідження якісних показників тендеризованого м'яса

Метою дослідження було визначення реологічних і фізико-хімічних властивостей фаршів із тендеризованого м'яса оскільки ці показники визначають якість та напрям подальшого використання тендеризованого м'яса на виробництві. До цих показників належать робота різання, граничне напруження зсуву нормальне, відносна деформація, піддатливість системи, модуль миттєвої пружності, модуль еластичності, пластична в'язкість, в'язкість пружної післядії, рН, вміст та форма вологи в тендеризованому м'ясі [109; 110].

До групи фізичних властивостей м'ясних виробів відносять структурно-механічні властивості, які можна класифікувати за характером прикладених до продукту зовнішніх зусиль і викликаних цими зусиллями деформаціях. Зусилля зсуву виявляються під час дії дотичних сил, компресійні властивості – у випадку виникнення нормальних зусиль, поверхневі – під час зсуву або відриву продукту від твердої поверхні. У залежності від прийнятої моделі реального тіла в кожній групі властивостей може існувати безліч характеристик: в'язкість, межі текучості, модулі пружності, коефіцієнт зовнішнього тертя тощо. Але всі реологічні характеристики м'яса можна отримати лише для фаршевих систем [97, 111].

Робота пенетрометра заснована на принципі занурення конусного індентора певної маси та розмірів за заданої температури протягом деякого часу всередину продукту. Зразки відбирали з трьох різних точок фаршу і розміщували у ємності. Під час розміщення зразків в ємності продукт ущільнювали таким чином, щоб не було повітряних включень. Надлишок продукту знімали шпателем, тримаючи його під кутом 45° в напрямку руху. Потім ємність встановлювали на предметний стіл. Після вмикання електродвигуна пенетрометра індентор приводився у рух з постійною швидкістю та зусиллям.

Під час торкання індентором поверхні зразка замикається електричний ланцюг, контактами якого є індентор і корпус приладу. З цього часу починається відлік тривалості занурення індентора з точністю до 0,01 с. Під час занурення індентора з'являються сили опору, що перешкоджають йому.

Відмінною особливістю пенетрометра ПМДП є вимірювання в автоматичному режимі на одному зразку двох параметрів: пенетрації та максимальної глибини занурення. За величиною останньої розраховували граничне напруження зсуву, використовуючи залежність визначену Ребіндером

$$\theta_0 = \frac{k \cdot m}{h_{\max}^2}, \quad (5.1)$$

де θ_0 – граничне напруження зсуву, Па;
 k – коефіцієнт конусу, Н/кг;
 m – робоча маса індентора, кг, ($m=0,098$ кг);
 h_{\max} – максимальна глибина занурення індентора, м.

За допомогою пенетрометра знаходиться граничне напруження зсуву як одна з важливих реологічних характеристик матеріалу, що використовуються для оцінки міцності його структури. Крім того, граничне напруження зсуву доцільно визначати перед початком досліджень на вагах для встановлення нижньої межі навантаження, за якого досліджуваний зразок починає текти. Під час визначення граничного напруження зсуву на пенетрометрі з метою визначення нижньої межі навантаження для дослідження зразків на еластопластометрі Толстого, необхідно отримане значення граничного напруження зсуву поділити на 3, виходячи з того, що модуль зсуву та модуль пружності пов'язані коефіцієнтом Пуассона, а отже, і граничне напруження зсуву, що визначається по нормалі в три рази більше, ніж граничне напруження зсуву, що визначається тангенційно [112].

Дослідження структурно-механічних властивостей отриманого фаршу визначали методами, які дозволяють одержати комплекс параметрів (відносна деформація, напруження зсуву, в'язкість, піддатливість, модуль пружності, модуль еластичності та ін.). Визначення показників здійснювали як шляхом одержання безпосередніх експериментальних даних, так і розрахунковим шляхом на підставі нижче наведених формул. Згідно із загальноприйнятими визначеннями експериментальні дані й дані, одержані за тангенційного зсуву, позначають символом γ , отримані з нормальним напруженням – ε . Вивчення структурно-механічних показників м'ясних фаршів проводили на модернізованому плоско-паралельному еластопластометрі Толстого (Рис. 5.1) [97, 113].

Метод заснований на визначенні деформації як відстані, віднесеної до товщини зразка – 8 мм, маса навантаження – 40 г. Звичайною мірою

процесу є не деформація, а піддатливість, тобто деформація, віднесена до постійно діючого напруження. Піддатливість в умовах експерименту є константою і не залежить від напруження. Деформацію зсуву визначали за зміщенням голки, закріпленої на верхній пластині гнучким зв'язком із датчиком лінійних переміщень.

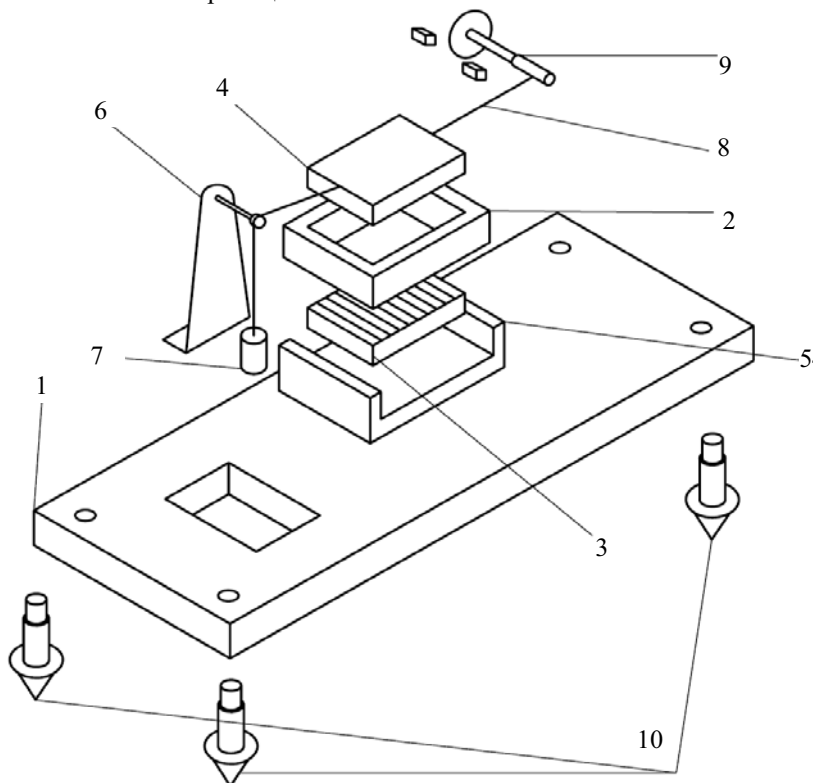


Рис. 5.1. Еластопластометр Толстого модернізований (деклараційний патент на корисну модель № 16116 U): 1 – станина; 2 – прямокутна форма у вигляді паралелограму; 3,4 – рифлені плексигласові пластини; 5 – корпус; 6 – консоль; 7 – вантаж; 8 – гнучкий зв'язок; 9 – датчик лінійних переміщень; 10 – опори

З одержаних результатів визначали в'язкопружні властивості системи: миттєвий модуль пружності (G_m), зворотну ($\gamma_{зв}$), незворотну ($\gamma_{незв}$)

деформації та коефіцієнт відношення зворотної деформації до загальної (K_γ), а також в'язкість (η), яку розраховували як котангенс кута нахилу лінійної ділянки графіку $\gamma = f(\tau)$ (Рис. 5.2)

Розрахунок в'язко-пружних характеристик проводили за формулами, які наведені нижче. Відносну деформацію визначали за формулою

$$\gamma = \frac{k \cdot n}{d}, \quad (5.2)$$

де k – величина співвідношення кількості піктелів у межі вимірювання, $k=10^{-3}$ м;

n – кількість піктел у межі вимірювання;

d – товщина зразка, м.

Коефіцієнт відношення зворотної деформації до загальної

$$K_\gamma = \frac{\gamma_{зв}}{\gamma_{заг}}, \quad (5.3)$$

де $\gamma_{зв}$ – зворотна деформація, м;

$\gamma_{заг}$ – загальна деформації, м.

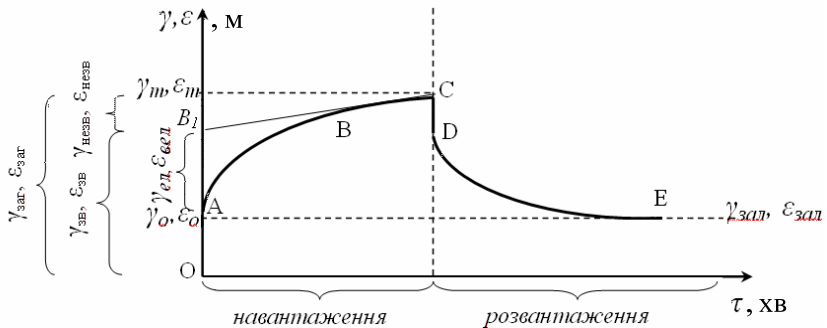


Рис. 5.2. Крива кінетики розвитку деформації дослідного зразка, під дією прикладеного напруження (при навантаженні та розвантаженні)

Модуль пружності визначали за формулою

$$G_m = \frac{1}{I}, \quad (5.6)$$

де G_m – модуль пружності, Па.

В'язкість визначали за формулою

$$\eta = \frac{(t_2 - t_1) \cdot d \cdot m \cdot g}{F \cdot (\gamma_2 - \gamma_1)}, \quad (5.7)$$

де η – в'язкість, Па·с;

$t_2 - t_1$ – інтервал вимірювання деформації, с;

$\gamma_2 - \gamma_1$ – зміна деформації зсуву за інтервал часу $t_2 - t_1$, хв.

Ніжність м'яса визначається методом Варнера-Братцлера на спеціальних апаратах – консистометрах. Метод заснований на вимірюванні сили, необхідної для перерізання зразка з відомою площею поперечного перетину. В основу метода Варнера-Братцлера в модифікації Максакова-Олейнікова покладене те, що на шматок м'яса площею поперечного перерізу 1 см^2 діє ніж з лезом у вигляді прямокутної ділянки завтовшки $0,5 \text{ мм}$ з силою, яку створює дріб, коли висипається в ємність, укріплену суцільно з ножем, створюючи в шматку м'яса напруження, пропорційні цій силі. При створенні на цю ділянку зусилля більшого, ніж граничне для цього зразка м'яса, ніж перерізає дослідний зразок. Вага дробу відноситься до площі перетину зразка, який досліджувався під час різання [114].

Пристрій для вимірювання сили різання складається з циліндричного корпусу 1, з наскрізним прямокутним отвором, на якому змонтовано черв'ячний редуктор 2.

Навантаження на зразок з площею перетину 1 см^2 передаються штоком 3, від черв'ячного вала шестерні 4, за допомогою динамометра годинникового типу 6, ножа 8, та предметного стола 9.

Пристрій працює наступним чином. Навантажувальному штоку 3 поступальний рух від електропривода передається за допомогою черв'ячного вала шестерні 4. Усередині навантажувального штока 3 є поздовжній отвір, по якому рухається штанга динамометра 5. Вимірювання прикладеного зусилля відбувається за допомогою динамометра годинникового типу 6 з ціною поділки 2 мкН .

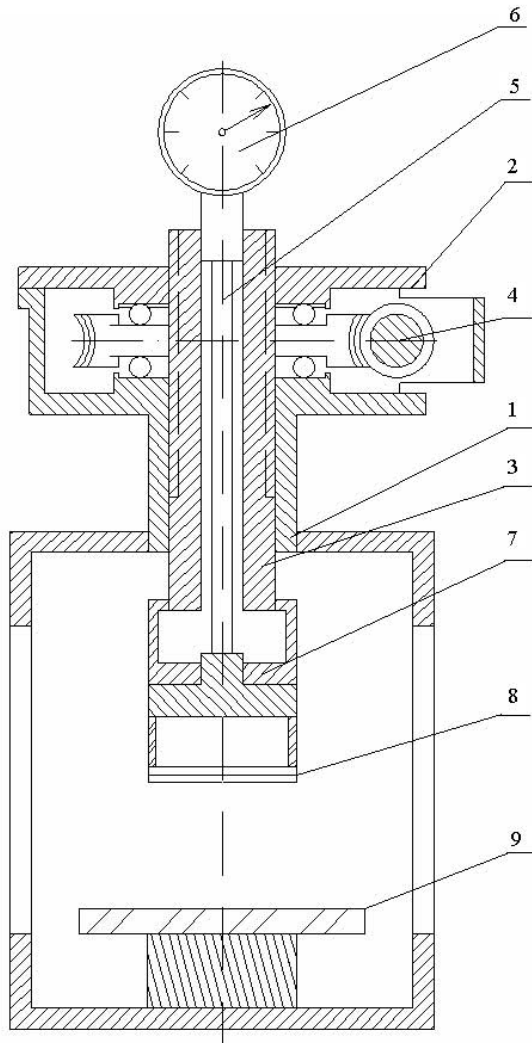


Рис. 5.3. Схема установки для визначення сили різання (патент на корисну модель № 48064 U): 1 – циліндричний корпус; 2 – черв’ячний редуктор; 3 – шток; 4 – черв’ячний вал-шестерня; 5 – штанга динамометра; 6 – динамометр годинникового типу; 7 – трубчаста пружина; 8 – ніж; 9 – предметний стіл.

Ніжка динамометра 5 проходить через поздовжній отвір штока й опирається в поліровану поверхню дна динамометра. До зіткнення площини леза ножа 8 з поверхнею зразка, при обертанні черв'ячного вала 4 штанга динамометру 5 і ніж 8 рухаються спільно. В момент, коли ніж 8 стикається з поверхнею зразка, який розташовано на поверхні предметного стола 9, шток 3 продовжує рухатися, стискаючи динамометр, ніжка індикатора 5 зупиняється, а сам індикатор 6 зі штоком 3 продовжує рухатися. Переміщення штока 3 з індикатором 6 при нерухомій ніжці 5 відповідає стисканню динамометра. Стискання динамометра в 1 мікрон відповідає сили 0,29 Н.

Ніжність м'яса розглядається як сила різання, якою навантажують прямокутний ріжучий елемент, щоб перерізати зразок визначеної площі в перетині. При цьому ширина леза елемента не враховується або вважається, що вона близька до нуля.

Для визначення роботи різання тендеризованого м'яса було спроектовано і виготовлено експериментальну установку, яка складалася з електром'ясорубки «Помощница КЕМ – 36» в якій використовувався електродвигун колекторного типу, який може працювати як від мережі постійного струму, так і від мережі однофазного змінного струму. За конструкцією він колекторний двигун постійного струму та вимірювального комплексу К 505.

Перетворення електричної потужності P , спожитої електричним двигуном з мережі, у корисну механічну потужність тотожні [115], але це твердження дійсне лише для двигунів постійного струму.

Для кожного визначення використовують м'ясо від одного й того ж м'яса. Після видалення поверхневих нашарувань жиру й сполучної тканини, м'ясо обсушували фільтрувальним папером. Перед вимірюванням м'ясо подрібнювали до розмірів шматочків 2x2, або 3x3 мм). Для зменшення похибки під час проведення експеримента необхідно забезпечити безперервне й рівномірне надходження шматочків випробуваних зразків м'яса на шнек м'ясорубки [116; 117]. Роботу різання $A_{\text{різ}}$ та потужність різання $P_{\text{різ}}$ знаходять за формулами

$$P_{\text{різ}} = P_{\text{зар}} - P_{\text{х.х}}, \quad (5.8)$$

$$A_{\text{різ}} = P_{\text{зар}} t. \quad (5.9)$$

де t – час роботи м'ясорубки, с;

$P_{\text{заг}}$ – загальна спожита потужність, Вт;

$P_{\text{х.х}}$ – потужність холостого ходу, Вт.

Під час тендеризації м'яса за допомогою УЗК з ВВСТ відбувається механічна дезагрегація колагену, з одночасним утворенням глютину, який має більшу кількість гідрофільних груп, що може призвести до збільшення здатності утримувати вологу, а зміна рН є ознакою механічного руйнування між білками сарколеми, у наслідок чого збільшується активна поверхня білкових молекул.

На здатність м'яса утримувати вологу впливає показник рН середовища. Відомо, що адсорбційна волога утримується в м'ясі, головним чином, білками за рахунок сил адсорбції. Диполі води фіксуються гідрофільними центрами білків. Чисельність заряджених груп білка, залежно від умов, у яких він перебував, може мінятися аж до нуля (в ізоелектричній точці). Здатність білків м'яса утримувати вологу тим вище, чим більше інтервал між величиною рН м'яса і його ізоелектричною точкою, тобто чим більше груп COOH і NH_2 буде іонізовано й виявиться зарядженими. М'ясо, що пройшло дозрівання, у процесі ультразвукової тендеризації не змінює величину рН, що у дослідженнях становила 5,5...6,0.

Визначення рН здійснювали за допомогою потенціометричного методу, заснованого на вимірі електрорушійної сили елемента, який складається з електрода порівняння з відомою величиною потенціалу і вимірювального H^+ селективного електрода, потенціал якого зумовлений концентрацією іонів водню у випробуваному об'єкті. Під час виконання досліджень, пов'язаних із визначенням рН, застосовувався іонометр універсальний «рН-Ев-74», налаштований на рН-метрію. Як індикаторний електрод застосовували скляний електрод, як електрод порівняння – хлорсрібний електрод [118].

Традиційно вміст зв'язаної та вільної води в зразках, що досліджувалися, визначали методом пресування. Для визначення здатності утримувати вологу фракцію продукту масою $m_0 = 0,3$ г зважували на торсіонних вагах марки ВТ-500. Перед роботою ваги встановлювали за рівнем за допомогою опорних гвинтів. Звільняли коромисло, пересуваючи закріпний важіль праворуч. Встановлювали показчик маси на нуль за допомогою важеля натягу і поєднували показчик рівноваги з рискою рівноваги за допомогою торувальної головки. Далі відкривали кришку корпусу, поміщали на підвіску досліджуваний продукт на кружку з поліетилену з діаметром, що дорівнює діаметру чашки ваг, закривали кришку і зважували продукт, рухаючи закріпний важіль праворуч і повертаючи важіль натягу з показчиком маси до сполучення показчика

рівноваги з ризику рівноваги.

Після зважування, м'ясний фарш переносили на фільтр, і розміщали таким чином, щоб фарш опинився під кружком. Попередньо фільтр витримували протягом 3 діб в ексікаторі над насиченим розчином хлориду кальцію для однорідного зволоження до вмісту вологи 8...9 %. Зверху продукт накривали такою ж пластинкою, як і нижня, установлюючи на неї вантаж масою 1 кг і витримували протягом 10 хвилин. Потім фільтр із продуктом звільняли від вантажу і нижньої пластинки, після чого олівцем окреслювали контур плями навколо спресованого м'яса. Зовнішній контур вимальовувався після висихання фільтрувального папера на повітрі. Площі плям, утворених спресованим м'ясом і адсорбованою вологою вимірювали планіметром.

Площа зовнішньої плями визначалась як різниця між загальною площею й площею плями, утвореної м'ясом.

Вміст зв'язаної вологи визначали за формулами

$$W_{зв1} = (A - 8,4Б) \cdot \frac{100}{m_0}, \quad (5.10)$$

$$W_{зв2} = (A - 8,4Б) \cdot \frac{100}{A}, \quad (5.11)$$

де $W_{зв1}$ – вміст зв'язаної вологи до маси напівфабрикату %;

$W_{зв2}$ – вміст зв'язаної вологи до загальної вологи %;

A – загальний вміст вологи в зразку, мг;

Б – площа вологої плями, см²;

m_0 – маса зразка, кг.

Вміст вільної вологи визначали за формулами

$$W_{віль1} = W - W_{зв1}, \quad (5.12)$$

$$W_{віль2} = 100 - W_{зв2}, \quad (5.13)$$

де $W_{віль1}$ – вміст вільної вологи до маси напівфабрикату %;

$W_{віль2}$ – вміст вільної вологи до загальної вологи %;

W – вміст загальної вологи до маси напівфабрикату %.

Для більш точного опису фізичної сутності процесу тендеризації

визначали показник, який характеризує відношення зв'язаної вологи до вільної вологи $W_{зв}/W_{віль}$. Для визначення поведінки та структури вологи, яка міститься в оброблених дослідних зразках, використовувався низькотемпературний калориметр, схема якого наведена на рис. 5.4.

Калориметрична камера 4, що є вимірювальною камерою, розміщується в оболонку 1. Як калориметрична камера, так і оболонка виконані із матеріалу з низькою теплопровідністю. Усередину вимірювальної камери поміщується досліджуваний об'єкт 5 – джерело явної та прихованої теплоти. Пари азоту потрапляють в камеру через отвір 2, а виходять через отвір 7, його подача здійснюється за допомогою вентилятора 9. Витрата парів азоту залежить від положення заслінки 18, яка знаходиться на виході з вимірювальної камери, та потужності нагрівача 12. Визначення різниці температур на вході і виході здійснюється за допомогою диференціальної термопари, один спай якої 3 знаходиться у вхідному отворі, а інший спай 8 – у вихідному.

Температура об'єкта вимірюється за допомогою термопари 6. Сигнал від диференціальної термопари фіксується самописцем безперервної дії 15, а сигнали від термопар 6 та 17 – самописцем 14. Через отвір 16 із судини Д'юара 11 в оболонку надходить азот. Витрата азоту регулюється за допомогою електричного нагрівача 12, потужність якого регулюється автотрансформатором 13. Вхідна температура у вимірювальній камері реєструється термопарою 17. В оболонці 1 під вимірювальною камерою розміщується вентилятор 10.

Розроблена методика заснована на низькотемпературному калориметричному методі виміру кількості теплоти, що виділяється під час кристалізації вільної вологи в харчовій сировині. Ідея методу полягає у вимірюванні сигналу диференціальної термопари, як це описано в [119; 120], що реєструє зміну температури потоку холодного повітря, яке омиває вологий матеріал.

Теорія методу заснована на рівнянні теплового балансу

$$\int_0^{\tau} cL\rho(t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}})d\tau = (c_{\text{в}}m_{\text{зв.в}} + c_{\text{о}}m_{\text{о}})\Delta T_1 + m_{\text{вільн.в}}(c_{\text{в}}\Delta T_2 + c_{\text{л}}\Delta T_3) + \rho m_{\text{вільн.в.}} \quad (5.14)$$

де c – питома теплоємність холодоносія (повітря), Дж/(кг·К);

L – об'ємна витрата холодоносія, м³/с;

ρ – густина холодоносія, кг/м³;

$t_{\text{вих}}$ – температура на виході із шару матеріалу, К;

$t_{\text{вх}}$ – температура на вході в шар матеріалу, К;

$c_{\text{в}}$ – питома теплоємність води, Дж/(кг·К);

$m_{\text{зв.в}}$ – маса зв'язаної вологи, кг;

c_0 – питома теплоємність сухої речовини, Дж/(кг·К);

m_0 – маса сухої речовини, кг;

$m_{\text{вільн.в}}$ – маса вільної вологи;

$c_{\text{л}}$ – питома теплоємність льоду, Дж/(кг·К);

r – питома теплота плавлення льоду, Дж/кг.

$$\Delta T_1 = T_0 - T_{\text{к}}, \quad (5.15)$$

$$\Delta T_2 = T_0 - 273, \quad (5.16)$$

$$\Delta T_3 = 273 - T_{\text{к}}, \quad (5.17)$$

де T_0 – початкова температура зразка, К;

$T_{\text{к}}$ – кінцева температура зразка, К.

Величини цих температур визначаються за допомогою термопар, спай якої розміщений у зразку.

Ліва частина рівняння (5.14) пропорційна площі під кривою зміни сигналу від диференціальної термопарі з часом

$$S_1 = \int_0^{\tau} I^*(\tau) d\tau = \chi \int_0^{\tau} cL\rho(t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}) d\tau, \quad (5.18)$$

де S_1 – площа під кривою сигналу від диференціальної термопарі, м·с;

χ – апаратурний коефіцієнт, (м·с)/Дж.

Калібрування сигналу від диференціальної термопарі проводилося за результатами, отриманими в процесі кристалізації чистої води для зразків різної маси. У результаті чого був визначений масштабний коефіцієнт M_1

$$M_1 = \frac{c_{\text{в}}\Delta T_2 + c_{\text{л}}\Delta T_3 + r}{S_1}, \quad (5.19)$$

де M_1 – масштабний коефіцієнт, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}$.

Значення фізичних величин, що входять до формули (5.19) беруться з таблиць довідкових даних [121]. Далі після проведення досліду з охолодження зразка із заданим вологовмістом, для даного виду харчової сировини обчислюється питома теплоємність сухих речовин

$$c_0 = \frac{S_I \cdot M_I}{\Delta T}. \quad (5.20)$$

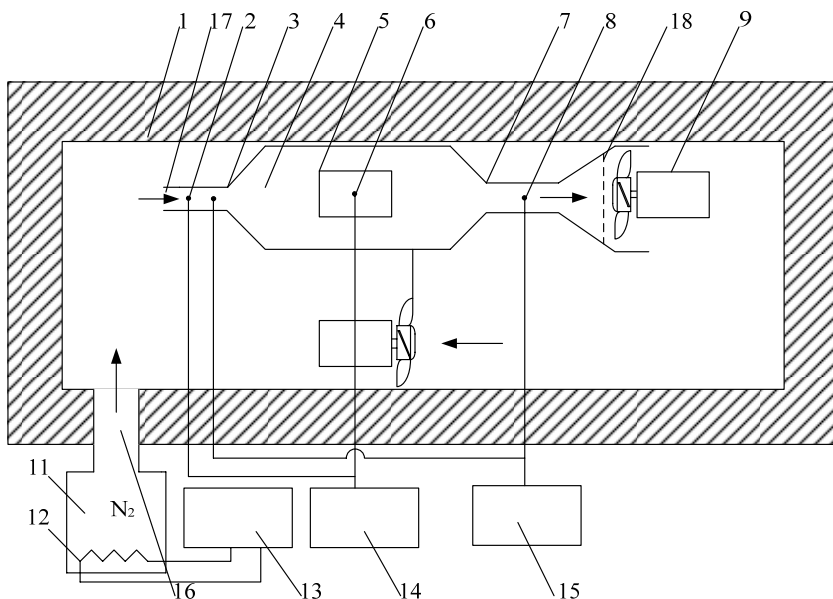


Рис. 5.4. Принципова схема низькотемпературного калориметру:
 1 – оболонка; 2, 7 – вхідний та вихідний отвори вимірювальної камери; 3, 8 – спаї диференціальної термопар; 4 – вимірювальна камера; 5 – досліджуваній об’єкт; 6, 17 – спаї термопар; 9, 10 – вентилятори; 11 – судина Д’юара з рідким азотом (N₂); 12 – нагрівач; 13 – автотрансформатор; 14, 15 – електронні самописи; 16, 17 – вхідні отвори; 18 – заслінка.

Шукані вологовмісти вільної та зв’язаної води визначаються з розв’язання системи рівнянь

$$(c_B w_{зв.в} + c_0) \Delta T_1 + w_{вільн.в} (c_B \Delta T_2 + c_L \Delta T_3) + r w_{вільн.в} = S_I M_I w, \quad (5.21)$$

$$w_{зв.в} + w_{вільн.в} = w. \quad (5.22)$$

Звідки

$$w_{вільн.в} = \frac{S_I M_I w - \Delta T_1 (c_B w + c_0)}{c_B \Delta T_2 + c_L \Delta T_3 + r - c_B \Delta T_1}, \quad (5.23)$$

$$w_{зв.в} = \frac{c_0 \Delta T_1 + w (c_B \Delta T_2 + c_L \Delta T_3 + r - S_I M_I)}{c_B \Delta T_2 + c_L \Delta T_3 + r - c_B \Delta T_1}, \quad (5.24)$$

де $w_{вільн.в}$ – відносний вміст вільної води, відн.од.;

$w_{зв.в}$ – відносний вміст зв'язаної води, відн.од.;

w – загальний вологовміст зразка, відн.од.

$$w_{вільн.в} = \frac{m_{вільн.в}}{m_0}, \quad (5.25)$$

$$w_{зв.в} = \frac{m_{зв.в}}{m_0}. \quad (5.26)$$

Метою дослідження було визначення реологічних властивостей фаршів із тендеризованого м'яса, стану та структури води в ньому та величини рН, оскільки ці показники визначають якість та напрям подальшого використання тендеризованого м'яса на виробництві. До цих показників належать робота різання, граничне напруження зсуву нормальне, відносна деформація, піддатливість системи, модуль миттєвої пружності, модуль еластичності, пластична в'язкість, в'язкість пружної післядії, рН, вміст та форма води в тендеризованому м'ясі [122; 123].

Для визначення цих показників, м'ясо подрібнювали на м'ясорубці, із діаметром отворів підрізної решітки 5 мм. Подальші дослідження проводили з фаршем. Як контроль використовували фарш з м'яса не тендеризованого ультразвуком. Результати проведених досліджень представлені у табл.5.1 та у табл.5.2, та рис. 5.5, рис. 5.6.

Як можна побачити із залежності (рис. 5.5), збільшення тривалості ультразвукової обробки впливає на величину роботи та сили різання. Зменшення величин роботи та сили різання може свідчити про те, що збільшилася кількість води у м'ясі, відбулося пом'якшення сполучної

тканини. Крім того зменшення $A_{\text{різ}}$ та $F_{\text{різ}}$ в перші $15 \cdot 60^{-1}$ с обробки розвивається в незалежності від сорту м'яса, розбіжності виявляються лише після $20 \cdot 60^{-1}$ с обробки, це зумовлено морфологічними ознаками м'яса різного сорту.

Граничне нормальне напруження зсуву визначалося для визначення тангенційного напруження зсуву, яке характеризується величиною вантажу, під дією якого фарш деформується протягом $60 \cdot 60^{-1}$ с, оскільки ці напруження пов'язані співвідношенням [124; 125].

Крім того, граничне напруження зсуву як самостійна реологічна величина показує, що контрольний зразок має найбільше граничне напруження зсуву, після ультразвукової обробки граничне напруження зсуву зменшувалось залежно від тривалості обробки до 45%. Дані зміни можуть свідчити про те, що ультразвукова обробка яловичини з ВВСТ дозволяє суттєво зменшити його жорсткість [126; 127].

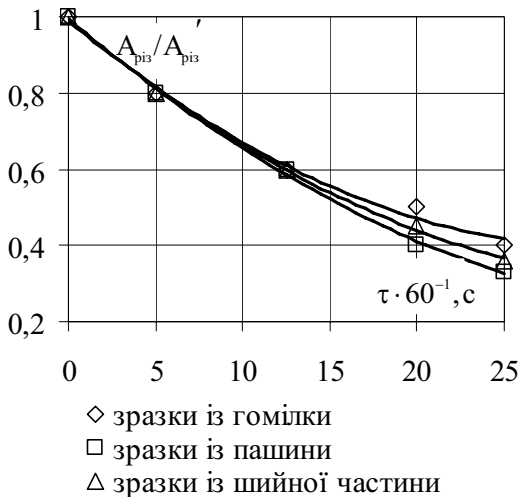


Рис. 5.5. Зміна роботи та сили різання, у відносних одиницях, від тривалості УЗ-обробки випромінювачем з частотою 22 кГц різних частин яловичої туші

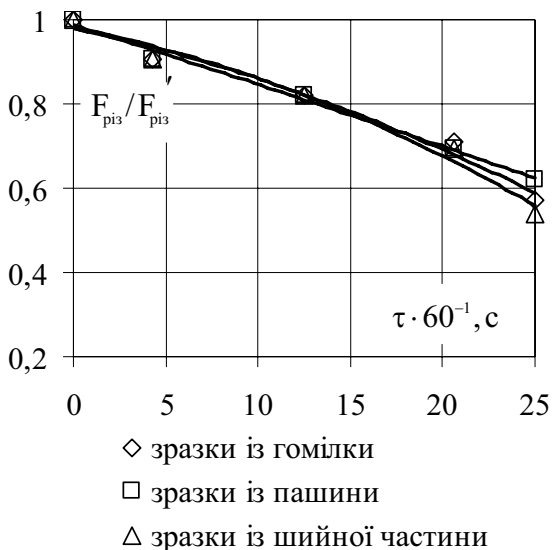


Рис. 5.6. Зміна роботи та сили різання, у відносних одиницях, від тривалості УЗ-обробки випромінювачем з частотою 22 кГц різних частин яловичої туші

Результати дослідження реологічних властивостей сировини показують що робота різання, граничне напруження зсуву нормальне, відносна деформація, модуль миттєвої пружності, модуль еластичності, пластична в'язкість, в'язкість пружної післядії із збільшенням тривалості обробки зменшуються. Це може пояснюватися тим, що під дією ультразвукової обробки збільшується проникність міжклітинних мембран, кількість рідини в клітинах збільшується, що, в свою чергу, призводить до покращення консистенції тендеризованого м'яса [128; 129]. Крім того, під дією ультразвукової обробки може відбуватися механічна дезагрегація колагена з одночасним утворенням глютину, який має більшу кількість гідрофільних груп, що може призвести до збільшення здатності утримувати вологу. Цю гіпотезу може підтвердити збільшення величини піддатливості системи.

Результати дослідження зміни реологічних властивостей м'ясної сировини в процесі обробки за допомогою УЗ

Показники	Тривалість обробки зразків із гомілки, $\tau \cdot 60^{-1}$, с					
	Контроль	5	10	15	20	25
Граничне напруження зсуву, 10^3Па	2,40	2,31	1,48	1,41	1,37	1,33
Відносна деформація, 10^3 м	0,15	0,21	0,25	0,29	0,32	0,33
Піддатливість системи, 10^{-4}Па^{-1}	5,85	7,95	9,71	10,92	12,3	12,9
Напруження зсуву, Па	261	261	261	261	261	261
Модуль миттєвої пружності, 10^3Па	15,7	9,45	4,75	3,35	2,31	2,25
Модуль еластичності, 10^3 Па	2,39	2,29	1,84	1,84	1,47	1,43
Пластична в'язкість, $10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}$	5,91	4,81	3,91	3,69	3,54	2,19
В'язкість пружної післядії, $\cdot 10^3 \text{ Па}\cdot\text{с}$	7,18	7,09	4,25	3,95	3,22	3,18

Із даних табл. 5.2 та рис. 5.7, рис. 5.8 видно, що під дією енергії ультразвукових коливань відбувається перерозподіл форми зв'язку води в м'ясі. Зменшується вміст вільної води в зразках тендеризованого м'яса у межах (0...15)·60 с УЗ-обробки, а вміст зв'язаної води в зразках тендеризованого м'яса збільшується.

Таблиця 5.2

Результати дослідження стану вологи та рН тендеризованого м'яса

Показники	Тривалість обробки зразків із гомілки, $\tau \cdot 60^{-1}, \text{с}$					
	Контроль	5	10	15	20	25
Кількість зв'язаної вологи за методом пресування, %	35	37	44	48	45	44
Кількість вільної вологи за методом пресування, %	65	63	56	52	55	56
Кількість зв'язаної вологи за калориметричним методом, %	26	30	37	40	38	37
Кількість вільної вологи за калориметричним методом, %	74	70	63	60	62	63
Кислотність, рН	6,01	5,75	5,71	5,69	5,67	5,64

Це пояснюється тим, що ультразвукова обробка призводить до деформації тривимірної структури колагену за рахунок послаблення та розривів водневих зв'язків, які утримують поліпептидні ланки, які в результаті розривів зв'язків змінюються та між ними виникають нові зв'язки. УЗ-обробка у межах (15...25)·60 с призводить до зменшення вмісту зв'язаної вологи, та збільшення вмісту вільної вологи[130; 131]. Це пояснюється тим, що колагенові волокна сполучної тканини втрачають здатність до гідратації. Диференціювання за часом залежностей структур вологи дає можливість отримати раціональну тривалість процесу тендеризації за допомогою УЗК – 15·60 с

Результати досліджень структури вологи, отримані різними способами, добре корелюють між собою. Зменшення величини рН може бути ознакою механічного руйнування між білками сарколеми, у наслідок чого збільшується активна поверхня білкових молекул[132; 133].

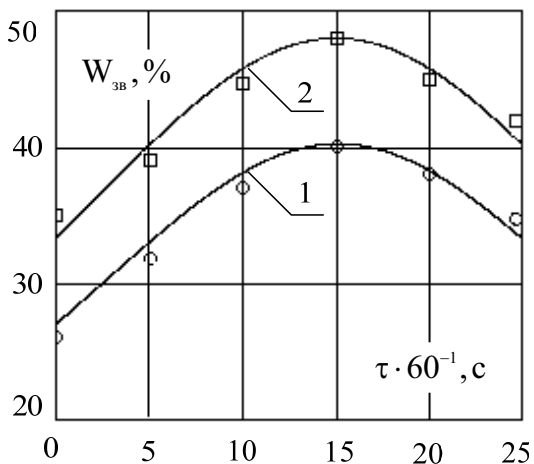


Рис. 5.7. Зміна стану води у тендеризованому м'ясі від тривалості УЗ-обробки випромінювачем з частотою 22 кГц: 1 – калориметричним методом, 2 – методом пресування

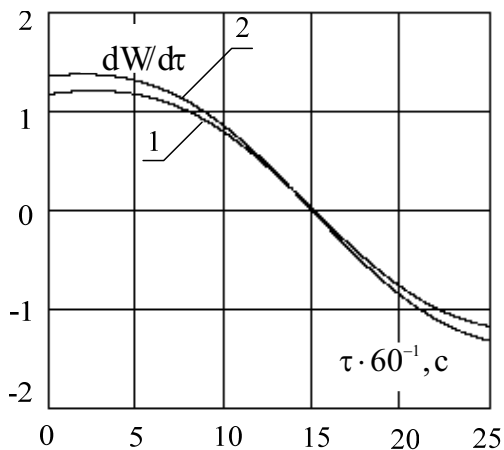


Рис. 5.8. Перша похідна залежності стану води від тривалості УЗ-обробки випромінювачем з частотою 22 кГц: 1 – калориметричним методом, 2 – методом пресування

5.2. Результати гістологічних досліджень

Проведені гістологічні дослідження дозволяють наочно судити о змінах в морфологічній структурі м'ясної сировини після тендеризації, оскільки м'язова тканина являє собою структурно-функціональний комплекс м'язових волокон і з'єднувальної тканини, що створює каркас із з'єднувальної тканини та м'язів, у якому проходять судини і нерви. М'язові волокна формують пучки, у складі яких вони розділені прошарками м'якої з'єднувальної тканини – ендомізієм. Пучки м'язових волокон оточені більш товстими прошарками м'якої з'єднувальної тканини – перемізієм. М'язи гомілки, зразки яких досліджувалися, мають пір'ясту будову (за розташуванням м'язових волокон) і характеризуються додатково наявністю сухожильних прошарків, що глибоко проникають у м'язове черевце. Ці прошарки побудовані із щільної з'єднувальної тканини. Така структура м'язів добре простежується у всіх досліджених зразках м'язів (рис. 5.9).

З'єднувальні тканини характеризуються наявністю в їх складі великої кількості міжклітинної речовини, що складається з основної (аморфної) речовини і волокон. Основна речовина на гістопрепаратах виглядає гомогенною, на рис. 5.9 вона не забарвлена.

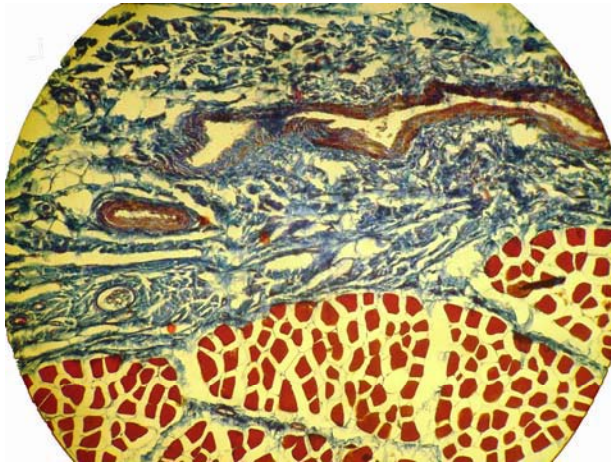


Рис. 5.9. Контроль. Загальна структура м'яза. Забарвлення за Маллорі. М'язові волокна – червоного кольору, волокна колагену ендомізія, перемізія і сухожильного прошарку (зверху) – синього кольору. Об'єктив 20х. Окуляр 10х. Jenamed

В її складі головними хімічними компонентами є глікопротеїни і протеоглікани. Останні є комплексними сполуками глікозаміногліканів (ГАГ) з білками. У волокнистих з'єднувальних тканинах ГАГ представлені переважно гіалуроновою кислотою (вміст якої зумовлює здатність з'єднувальної тканини до гідrataції), а також хондроїтин-6-сульфатом. Волокна є каркасними елементами, що забезпечують біомеханічні властивості м'яза, а також технологічні властивості м'язової тканини, як м'яса. Серед волокон переважають волокна колагену - забарвлені на рис. 5.9 у синій колір. Волокна колагену ендомізії і перемізії уплетені в зовнішній шар сарколеми (базальна мембрана) і формують ніжну рівномірно розподілену мережу (рис. 5.10, рис. 5.11). В утворенні волокон колагену разом з білком проколагеном (тропоколаген) беруть участь протеоглікани і структурні глікопротеїни, що виконують функцію інтерфібрилярної цементуючої речовини. У зв'язку з цим волокна колагену, з хімічної точки зору, є гетерогенними.

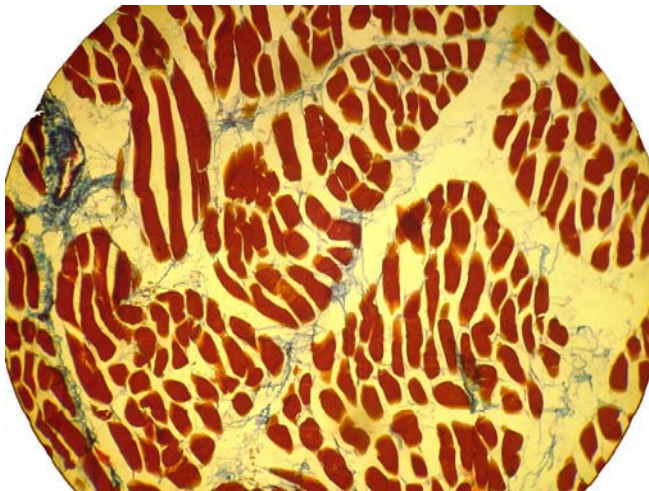


Рис. 5.10. Контроль. Забарвлення за Маллорі. М'язові волокна – червоного кольору, волокна колагену ендомізії і перемізії – синього кольору. Об'єктив 20х. Окуляр 10х. Jenamed

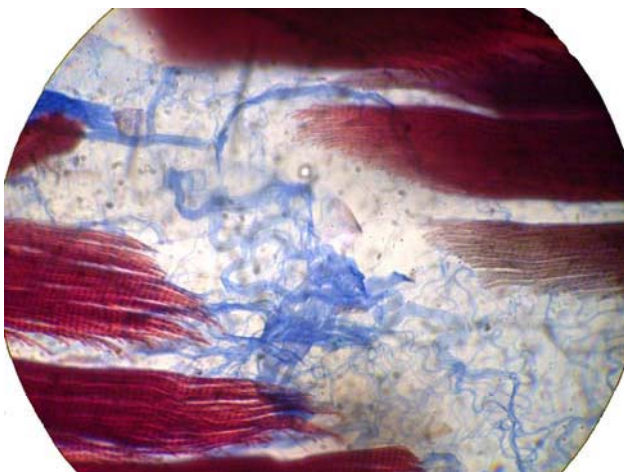


Рис. 5.11. Контроль. Зabarвлення за Маллорі. М'язові волокна – червоного кольору, волокна колагену перемізія – синього кольору. Об'єktiv 100x. Окуляр 10x. Jenamed



Рис. 5.12. Контроль. Зabarвлення за Маллорі. Спіралевидна конфігурація волокон колагену. Об'єktiv 100x. Окуляр 10x. Jenamed

Особливістю структурної організації волокон колагену є утворення пучків різної товщини з характерною хвилястою або у вигляді спіралі конфігурацією (рис. 5.11).

Обробка УЗ дослідного зразка протягом 5 хвилин морфологічно виявила часткову втрату спіральності волокон колагену м'якої з'єднувальної тканини ендомізія і перемізія (рис. 5.12, 5.13). При цьому волокна зберігають досить чіткий контур (рис. 5.14). Волокна ендомізія втрачають зв'язок із базальною мембраною сарколеми (рис. 5.15). М'язові волокна розпушуються. На поперечному і поздовжньому їх зрізах видно проміжки між міофібрилами (рис. 5.12, рис. 5.13).

Під час морфометричного дослідження встановлене збільшення товщини м'язових волокон майже на 20% (26,11мкм – контроль і 31,47мкм – дослід) і одночасне зменшення товщини прошарків ендомізія на 12 % (відповідно 14,37 мкм і 12,69 мкм).

Таким чином, морфологічні зміни з урахуванням результатів морфометрії показують, що первинна реакція на 5–хвилинну обробку УЗ проявляється набряканням м'язових волокон за рахунок гідратації глобулярних білків саркоплазми. Відзначається також, але в меншій мірі, гідратація і аморфна речовина з'єднувальної тканини переважно ендомізія і перемізія. З боку волокон колагену має місце часткова дезінтеграція, що проявляється зміною конфігурації волокон і втратою ними структурного зв'язку із сарколемою м'язових волокон.

Після обробки УЗ дослідного зразка протягом 10 хвилин морфологічні зміни у зразках носять подібний характер, як і за 5–хвилинного озвучування, але темпи зміни товщини м'язових волокон і ендомізія трохи міняються. Так, товщина м'язових волокон збільшується на 7 % (відповідно 23,81мкм і 25,51 мкм), а товщина ендомізія зменшується майже на 30 % (16, 94 мкм і 11,98 мкм). Така динаміка зміни співвідношення розглянутих параметрів може свідчити про зміну фізико-хімічних властивостей аморфної речовини м'якої з'єднувальної тканини, та зниженню її гідратації. При цьому відзначається незначне набрякання пучків волокон колагену у перемізії (рис. 5.16), у результаті чого губиться чіткість контурів волокон колагену у пучках (рис. 5.17).

Після 15–хвилинної обробки УЗ в дослідних зразках встановлюється „відносна рівновага” у розподілі рідинної фази. Це підтверджується як морфологічною картиною на гістозрізах, так і морфометричними показниками. (Розходження між морфометричними показниками контрольних і дослідних зразків становлять близько 1%). З боку м'язових волокон відсутні морфологічні ознаки набрякання і

розпушення міофібрил. На поперечних зрізах вони забарвлюються рівномірно (рис. 5.18, 5.19).

При цьому вплив УЗ морфологічно проявляється більш глибокими змінами волокон колагену вже не лише в пухкій з'єднувальній тканині ендомізія і перемізія, але і у щільній з'єднувальній тканині сухожильних прошарків, волокна колагену мають розмитий вигляд, а у великих пучках контури окремих волокон погано визначаються (рис. 5.20, 5.21, 5.22).

Обробка зразків УЗ протягом 20–хвилин призводить до глибоких деструктивних змін всіх компонентів м'язової і з'єднувальної тканини. Відбуваються порушення структурної цілісності сарколеми, розпушення внутрішньої структури м'язових волокон. Відзначається дезінтеграція міофібрил, фрагменти яких у великій кількості виявляються за межами м'язових волокон. При цьому товщина волокон зменшується майже на 25 % (30,06 мкм і 22,82 мкм відповідно), що вказує на втрату компонентів саркоплазми в результаті ушкодження сарколеми, волокна колагену ендомізія погано забарвлюються та фрагментовані (рис. 5.23).

Після більш тривалої обробки УЗ, протягом 25–хвилин, відбувається лізис волокон колагену, а також волокнистого каркаса стінок судин, що перебувають у перемізії. Це вказує на те, що після обробки змінюються фізико-хімічні властивості не лише гіалуронової кислоти, але і хондроїтинсульфатів у складі як аморфної речовини, так і волокон колагену. Губляться гідрофільні властивості основної (аморфної) речовини з'єднувальної тканини, що забезпечуються гіалуроновою кислотою. У м'язових волокнах мають місце глибокі деструктивні зміни, що супроводжуються порушенням їхньої цілісності.

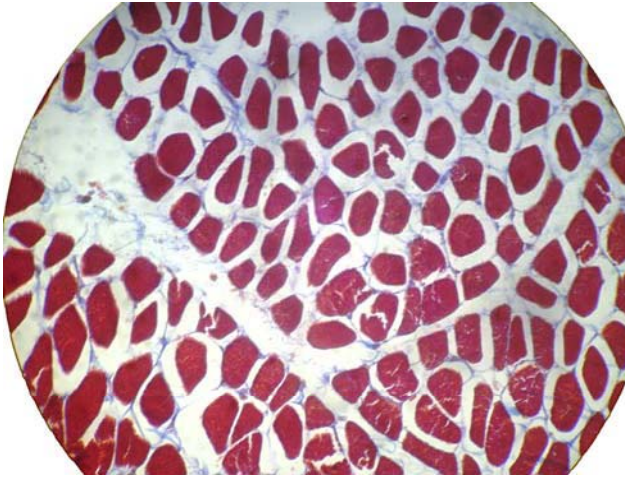


Рис. 5.13. Дослід. Обробка УЗ протягом 5 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Розпушення м'язових волокон (поперечний зріз). Об'єктив 40х. Окуляр 10х. Jenamed

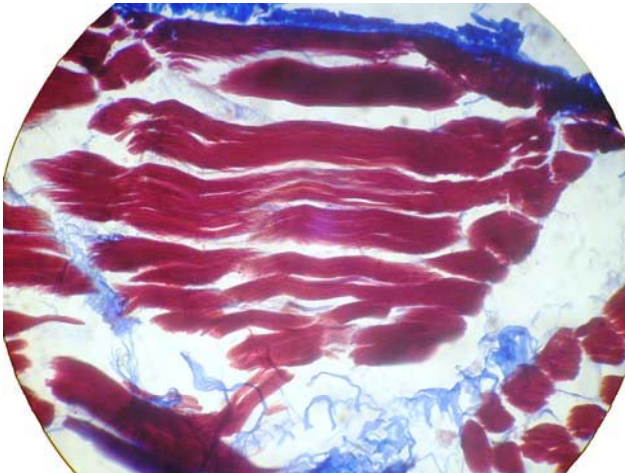


Рис. 5.14. Дослід. Обробка УЗ протягом 5 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Розпушення м'язових волокон (поздовжній зріз). Порушення зв'язків волокон колагену із сарколемою. Часткова втрата спіральної конфігурації волокнами колагену. Об'єктив 40х. Окуляр 10х. Jenamed

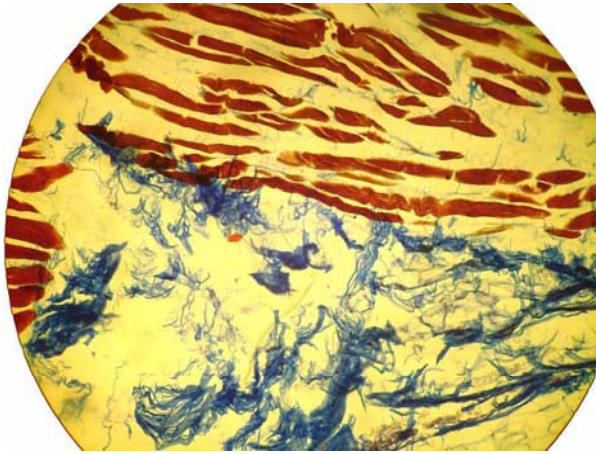


Рис. 5.15. Дослід. Обробка УЗ протягом 10 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Незначне набрякання волокон колагену у перемізії. Об'єktiv 20х. Окуляр 10х. Jenamed

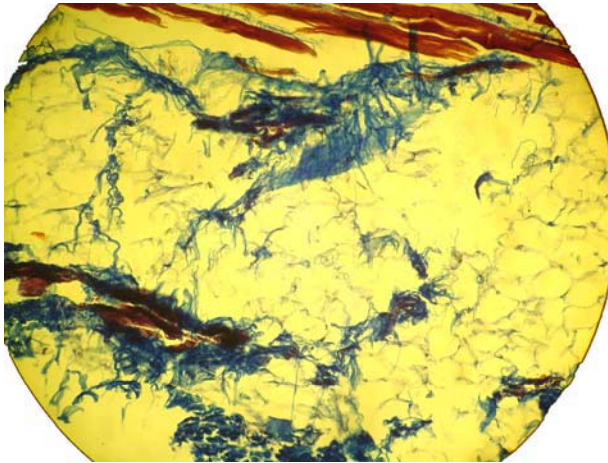


Рис. 5.16. Дослід. Обробка УЗ протягом 10 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Незначне набрякання волокон колагену у перемізії. Об'єktiv 20х. Окуляр 10х. Jenamed

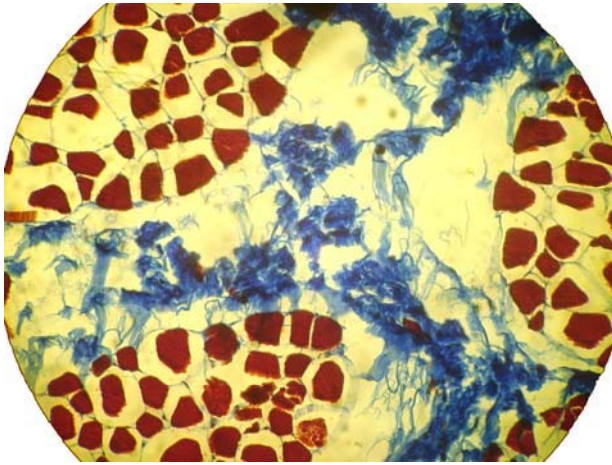


Рис. 5.17. Дослід. Обробка УЗ протягом 15 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Набрякання волокон колагену у перемізі. Відсутність чіткого рисунка пучків волокон колагену. Об'єктив 40х. Окуляр 10х. Japamed

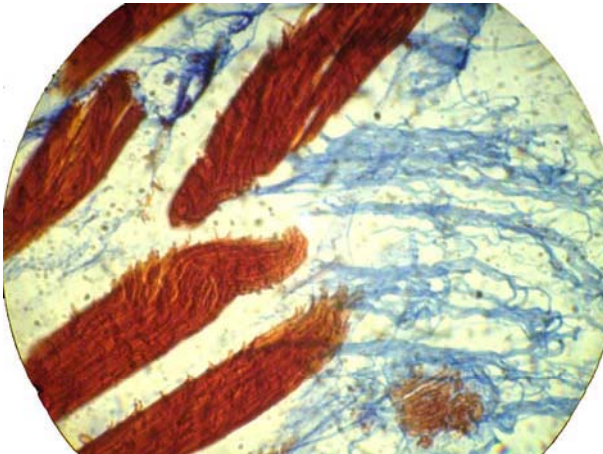


Рис. 5.18 Дослід. Обробка УЗ протягом 15 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Щільне розташування міофібрил у м'язових волокнах. Набрякання волокон колагену у перемізі. Розмитий контур волокон.

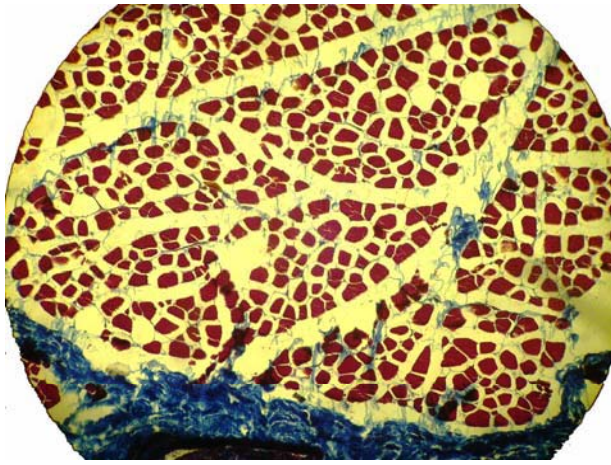


Рис. 5.19. Дослід. Обробка УЗ протягом 15 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Втрата спіралевидності волокнами колагену в ендомізії та перемізії. Відсутність чіткої контурності пучків волокон колагену у сухожильних прошарках (знизу). Об'єктив 20х. Окуляр 10х. Jenamed

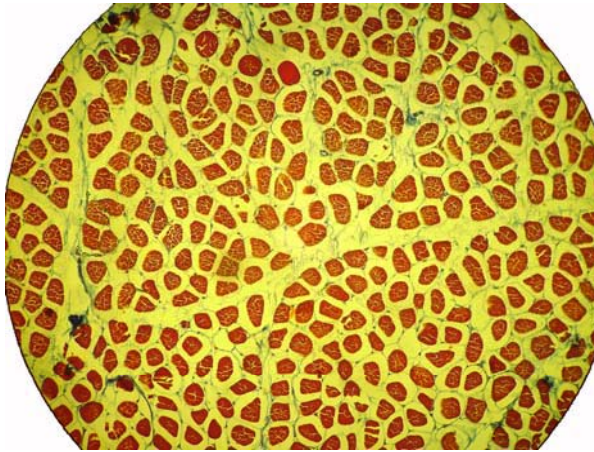


Рис. 5.20. Дослід. Обробка УЗ протягом 20 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Розпушення м'язових волокон (поперечний зріз). Слабке забарвлення волокон колагену ендомізія і перемізія.

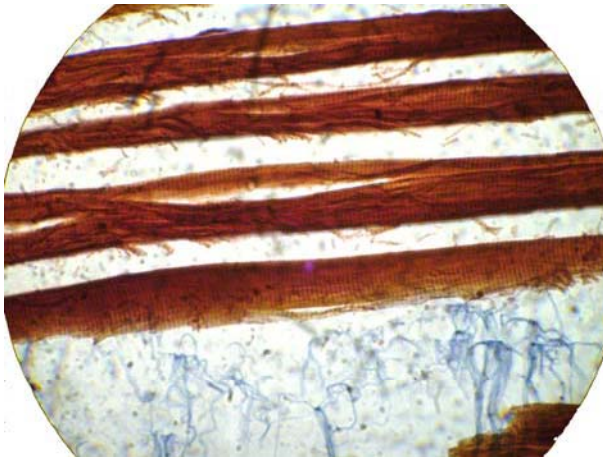


Рис. 5.21. Дослід. Обробка УЗ протягом 20 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Розпушення внутрішньої структури м'язових волокон і ушкодження сарколеми. Об'єktiv 100x. Окуляр 10x. Jenamed

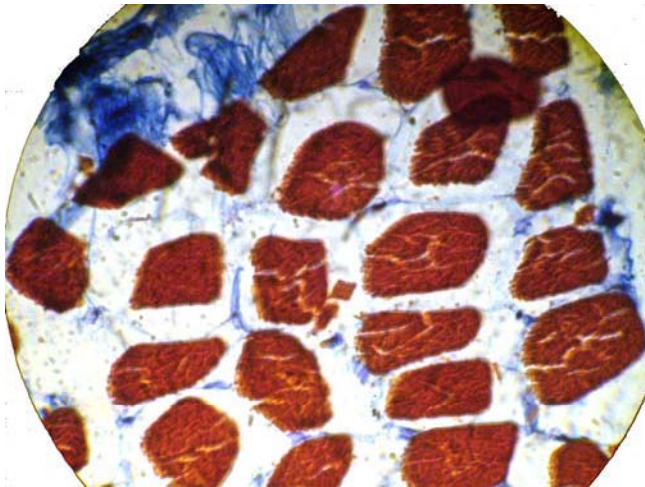


Рис. 5.22. Дослід. Обробка УЗ протягом 20 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Фрагментація каркасних елементів ендомізія (поперечний зріз). Об'єktiv 100x. Окуляр 10x. Jenamed

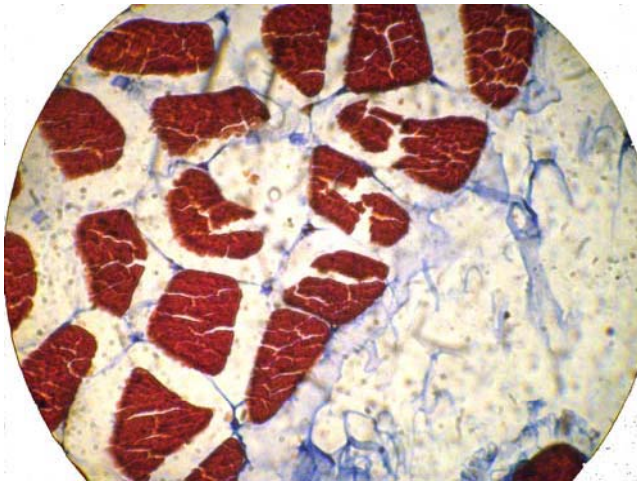


Рис.5.23. Дослід. Обробка УЗ протягом 25 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Лізис волокон колагену у перемізії та стінках судин. Порушення цілісності м'язових волокон (поперечний зріз). Об'єктив 100х. Окуляр 10х. Jenameed

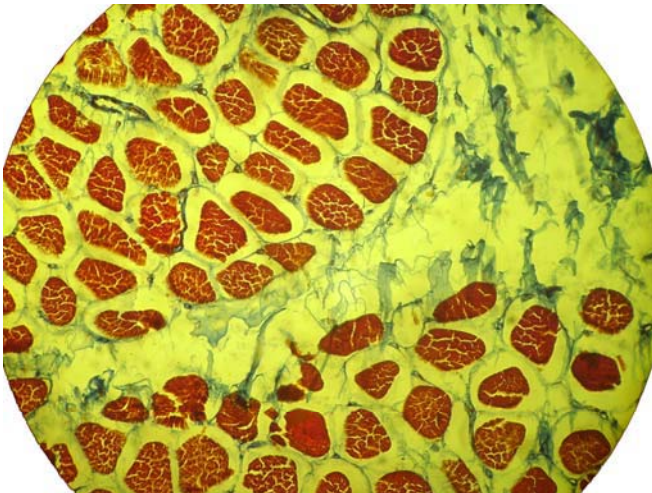


Рис.5.24. Дослід. Обробка УЗ протягом 25 хвилин. Забарвлення за Маллорі. Лізис волокон колагену у перемізії та стінках судин. Порушення цілісності м'язових волокон (поперечний зріз). Об'єктив 40х. Окуляр 10х. Jenameed

За обліком морфометричних даних можна припустити, що під час обробки протягом 25 хвилин м'язової тканини у водному середовищі відбуваються фізико-хімічні і структурні зміни білків саркоплазми, протеогліканів і глікопротеїнів міжклітинної речовини з'єднувальної тканини, що призводить до зниження вмісту зв'язаної вологи і збільшенню кількості вільної води, за рахунок якої відбувається збільшення товщини м'язових волокон і прошарків з'єднувальної тканини. При цьому здатність утримувати вологу м'язовою тканиною зменшується. Втрата фібрилярної структури волокнами колагену призводить до зменшення пружності м'язової тканини. Такі зміни погіршують технологічні і споживчі якості м'яса, що зумовлені втратою м'ясного соку під час кулінарної обробки.

Вплив УЗ на м'язову тканину вивчали гістологічним і морфометричним методами. Результати досліджень дозволили виявити структурні зміни у всіх гістологічних елементах м'язової тканини, що виникають при впливі УЗ. Дані морфометричних досліджень, наведені в табл. 5.3 дозволяють об'єктивно простежити динаміку цих змін у м'язових волокнах і з'єднувальній тканині залежно від тривалості впливу УЗ.

Під час аналізу мікроструктури контрольних зразків яловичини, не обробленого ультразвуковими коливаннями було виявлено, що сполучнотканинні компоненти включають строму м'язів і сухожилкові прошарки.

Строма формує сполучнотканинний каркас м'язів, представлений сукупністю тонких прошарків пухкої сполучної тканини: таких, що оточують кожне м'язове волокно і називаються ендомізієм, що об'єднують волокна у пучки – перимізієм та оточують зовні м'яз – епімізієм. У стромі проходять судини і нерви. Сухожилки побудовані із щільної сполучної тканини і заходять глибоко у м'язи. У складі міжклітинної речовини пухкої сполучної тканини ендомізію і перемізію переважає основна (аморфна) речовина, яка незабарвлена, а у щільній сполучній тканині сухожилків суттєво переважаючими є колагенові волокна.

На препаратах із контрольної групи матеріалу колагенові волокна ендомізію утворюють тонку рівномірно розподілену сітку і вплітаються у сарколему (оболонку) м'язових волокон. В перимізії вміст колагенових волокон більший. Волокна ендомізію і перимізію вплітаються також в сухожилки, які проникають у м'язове черевце.

Структурною особливістю колагенових волокон є здатність до утворення пучків різної товщини з характерною спіральною або

хвилястою конфігурацією, що чітко визначається на усіх препаратах контрольної групи. М'язові волокна мають чіткий контур. Деякі з них мають дещо хвилясту конфігурацію. В них визначаються поперечна і повздовжня смугастість.

Таблиця 5.3

Результати морфометричних досліджень

Параметри	Контроль	Дослід
5 хвилин		
Товщина м'язових волокон, 10^{-6} , м	26,11±1,07	31,47±1,99
Відстань між м'язовими волокнами (вздовж волокон), 10^{-6} , м	9,30±0,59	11,66±0,98
10 хвилин		
Товщина м'язових волокон, 10^{-6} , м	23,81±1,30	25,51±1,45
Відстань між м'язовими волокнами (вздовж волокон), 10^{-6} , м	11,31±1,15	11,14±0,76
15 хвилин		
Товщина м'язових волокон, 10^{-6} , м	23,29±1,17	23,23±0,74
Відстань між м'язовими волокнами (вздовж волокон), 10^{-6} , м	11,38±0,58	9,70±0,71
20 хвилин		
Товщина м'язових волокон, 10^{-6} , м	30,06±1,58	22,82±1,18
Відстань між м'язовими волокнами (вздовж волокон), 10^{-6} , м	16,35±0,89	11,38±0,70
25 хвилин		
Товщина м'язових волокон, 10^{-6} , м	37,41±1,18	31,04±1,72
Відстань між м'язовими волокнами (вздовж волокон), 10^{-6} , м	23,61±0,67	17,36±1,22

На препаратах експериментальної групи після обробки ультразвуком зрізною експозицією були встановлені такі зміни. Після обробки ультразвуком протягом 5 хвилин, рис. 5.25 праворуч, було встановлено, що у тендеризованому м'ясі набухають м'язові волокна і частково руйнуються контакти колагенових волокон ендомізю і

перемізію з сарколемою м'язових волокон. Під час морфометричних досліджень було встановлено збільшення товщини м'язових волокон на 19,3...20,5% та товщини прошарків ендомізію на 21,4...25,3%. Такі зміни зумовлені підвищенням гідратації білків саркоплазми та основної речовини пухкої сполучної тканини ендомізію та перемізію.

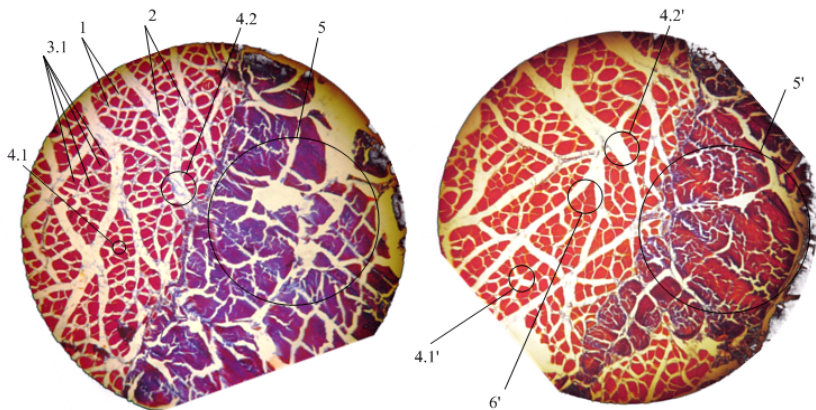


Рис. 5.25 Обробка ультразвуком протягом 5 хвилин (об'єктив 20х, окуляр 10х): 1 – ендомізію; 2 – перемізію; 3.1 – м'язові волокна, поперечний переріз; 4.1 – сітка колагенових волокон ендомізію; 4.2 – сітка колагенових волокон перемізію; 4.1', 4.2' – руйнація контактів колагенових волокон із сарколемою; 5 – прошарки сухожил

Зміни в тендеризованому м'ясі після УЗ-обробки протягом 10 хвилин подібні до попередніх, рис. 5.26 праворуч, але при цьому набухання м'язових волокон і рівень гідратації основної речовини ендомізію та перемізію збільшується. Товщина м'язових волокон збільшується на 7,1...9,2%, а товщина прошарків ендомізію зменшується до 2,6%. Збільшення тривалості УЗ-обробки до 15 хвилин, рис. 5.27 праворуч, призводить до суттєвих структурних змін усіх структурних компонентів м'язової тканини.

Колагенові волокна ендомізію, перемізію втрачають чіткий контур, набухають. Відмічені численні їх розриви, а також повна дезінтеграція як із сарколемою м'язових волокон, так і з сухожиллями. Серед м'язових волокон збільшується кількість волокон з хвилястою конфігурацією і локальними розривами.

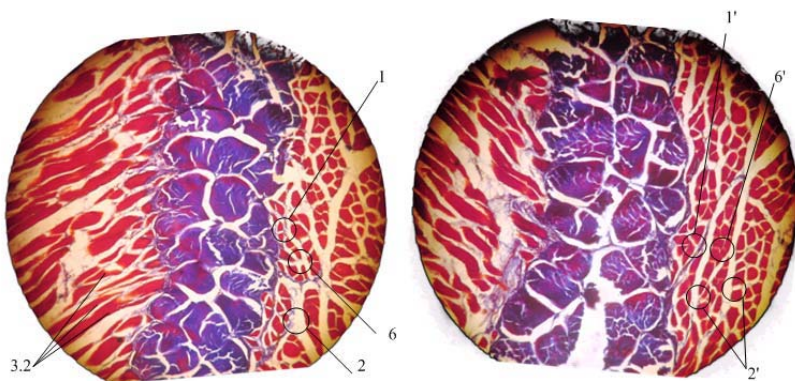


Рис. 5.26 Обробка ультразвуком протягом 10 хвилин (об'єктив 20х, окуляр 10х): 3.2 – м'язові волокна, повздовжній переріз; 6, 6' – зміна товщини прошарків ендомізію (набухання м'язових волокон). М'язові волокна – червоного кольору, волокна колагену ендомізія і перемізія – синього кольору

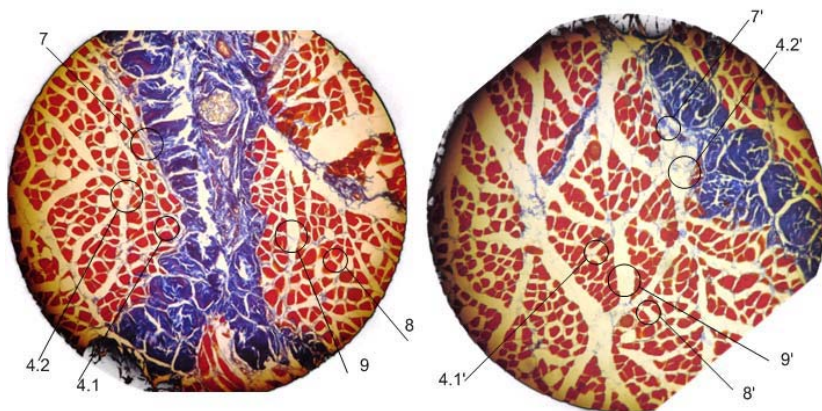


Рис. 5.27 Обробка ультразвуком протягом 15 хвилин (об'єктив 20х, окуляр 10х): 7 – сітка колагенових волокон перемізію, які влітають в сухожилля; 7' – дезінтеграція зв'язків каркасних елементів колагенових волокон із сухожиллями; 8, 8' – збільшення товщини прошарків ендомізію; 9, 9' – збільшення товщини прошарків перемізію

Встановлено, що рівень гідратації білків саркоплазми і колагенових волокон ендомізію та перемізію збільшується. На це вказують збільшення товщини м'язових волокон до 2,5% і товщини прошарків ендомізію на 14,7...16,1%. Обробка протягом 20 хвилин, рис. 5.28 праворуч, призводить до глибоких деструктивних змін в усіх компонентах м'язової тканини.

У м'язових волокнах мають місце розриви сарколеми, дезінтеграції міофібрил на саркомери, вихід компонентів саркоплазми за межі волокон. Елементи сполучної тканини втрачають здатність до гідратації і виявляють ознаки дегідратації. Встановлено, що в результаті таких процесів товщина м'язових волокон зменшується на 21,2...24,1%, товщина прошарків ендомізію зменшується на 28,6...30,4%, що свідчить про втрату здатності основної речовини підтримувати стан гелю.

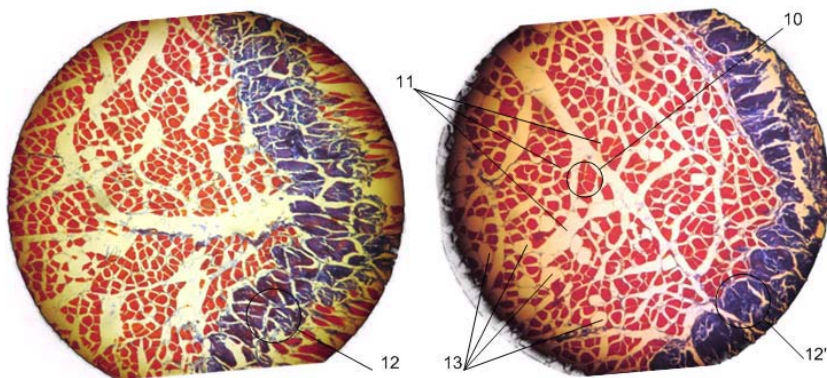


Рис. 5.28 Обробка ультразвуком протягом 20 хвилин (об'єktiv 20x, окуляр 10x): 10 – злипання окремих м'язових волокон у результаті порушення цілісності сарколеми; 11 – фрагменти міофібрил (саркомери) за межами м'язових волокон; 12, 12' – набухання колагенових волокон прошарків сухожиль (не видно прошарки ендотонію між пучками колагенових волокон); 13 – порушення структури пучків м'язових волокон в результаті дезінтеграції зв'язків м'язових волокон із каркасними елементами ендомізію

Після УЗ–обробки протягом 25 хвилин, рис. 5.29 праворуч, на гістозрізах виявляються численні ділянки лізису колагенових волокон, що є ознакою дезагрегації колагену і зміни його фізико-хімічних властивостей. При цьому товщина м'язових волокон в експериментальних зразках зменшується на 15,3...17,1%, а товщина прошарків ендомізію зменшується на 21,8...26,4%.

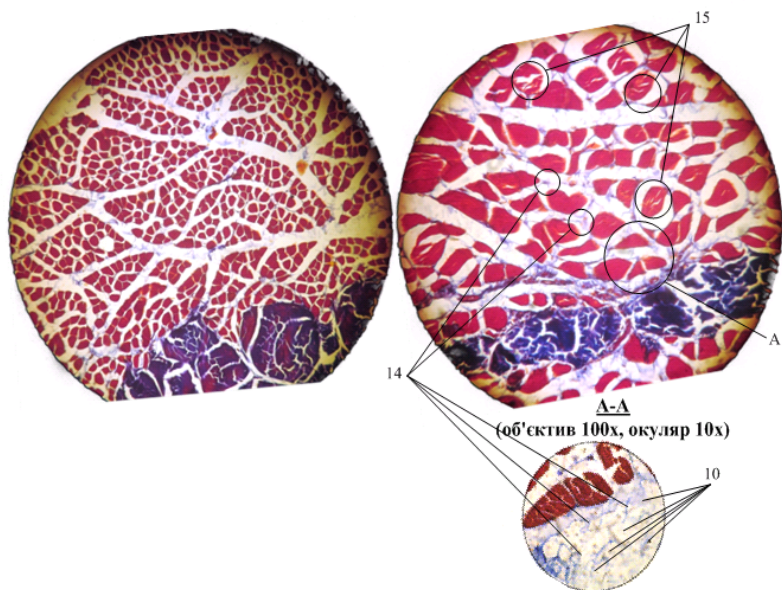


Рис. 5.29 Обробка ультразвуком протягом 25 хвилин (об'єктив 20x, окуляр 10x): 14 – розриви та лізис колагенових волокон ендомізію та перемізію; 15 – розриви м'язових волокон і розрихлення їх внутрішньої структури

На підставі проведеного мікроструктурного дослідження дослідних зразків компонентів яловичини з попередньою обробкою ультразвуком, можна зробити висновок, що мікроструктурні зміни у м'ясі яловичини при 5...10 хвилинному впливі ультразвуку спостерігається набухання м'язових волокон і розрихлення пучків

міофібрил, відзначається незначне набухання колагенових волокон і їх розшарування у складі пучків сухожилкових прошарків. При цьому можна зазначити, що під час збільшення тривалості ультразвукової обробки до 15...20 хвилин спостерігається повна дезінтеграція із сарколемою м'язових волокон та з сухожилками, а обробка протягом 25 хвилин – призводить до лізису волокон ендомізію та пермізію.

В загалі можна зазначити що під час обробки яловичини ультразвуком спостерігаються помірні деструктивні зміни м'язової й з'єднувальної тканини, набрякання з'єднувальної тканини, деяке розшарування й розпушення на окремі фібрили, в порівнянні з вихідним зразком. Зміни що відбуваються у м'язовій та з'єднувальній тканині, які можна спостерігати на гістопрепаратах, нагадують початкові процеси, які відбуваються під час механічної тендеризації - масування або тумблірування м'яса. Тобто, тендеризацію за допомогою ультразвуку можна використовувати на рівні з іншими способами тендеризації, для покращення морфологічної структури м'яса, збільшення його ніжності тощо.

РОЗДІЛ 6 РОЗРОБКА ПРОМИСЛОВОГО ЗРАЗКА АПАРАТА

6.1. Вимоги та обґрунтування конструкції апарата

Ультразвукова коливальна система (УЗКС) є пристроєм, що забезпечує перетворення енергії електричних коливань, що надходять від генератора, в пружні коливання резонансної коливальної системи і подача сформованих коливань в оброблювані технологічні середовища. УЗКС є основним вузлом будь-якого технологічного апарата, оскільки забезпечує не лише формування УЗ коливань, але і їх посилення до величин, необхідних для реалізації різних процесів за допомогою резонансних концентраторів, а також введення посилених ультразвукових коливань у технологічні середовища через різні за площею і формою робочі інструменти поверхні, що випромінює. Тобто конструкція УЗКС повинна мати:

- джерело енергії (генератор електричних коливань), який забезпечує перетворення енергії мережі змінного струму (50 Гц) в енергію електричних коливань ультразвукової частоти й призначений для живлення перетворювача ультразвукової коливальної системи;

- електромеханічний перетворювач магнітострикційного типу. У перетворювачі – активному елементі коливальної системи, відбувається перетворення електричної енергії в енергію пружних коливань ультразвукової частоти, і створюється знакоперемінна механічна сила;

- концентратор – пасивний елемент коливальної системи, здійснює трансформацію швидкостей і забезпечує узгодження зовнішнього навантаження й активного внутрішнього елемента, підсилювач амплітуди ультразвукових коливань. Застосування концентратора забезпечує необхідну амплітуду коливань робочого органа (10...70 мкм) на заданій робочій частоті;

- робочий орган – випромінювач – створює ультразвукове поле в об'єкті, що оброблюється або безпосередньо впливає на нього;

- робоча камера – циліндрична ванна з проміжним середовищем, в якій розташовано сітчастий кошик з оброблюваним продуктом

Практично всі створені і використовувані в даний час УЗ технологічні апарати є вузькоспеціалізованими і вимагають індивідуального налаштування і оптимізації режимів роботи при зміні оброблюваних середовищ, зміні вимог за оптимальною інтенсивністю для реалізації різних технологічних процесів, тому вимірювання ультразвукової енергії суттєве для кількісної оцінки результатів, що отримуються під час використання ультразвуку в різних процесах, моделюванні. Основне завдання, яке вирішується під час інтенсифікації технологічних процесів, є забезпечення

такої інтенсивності ультразвукового випромінювання, при якій ефективність буде максимальною при мінімальних затратах енергії. Для цього потрібно провести розрахунок магнітострикційної УЗКС.

6.2. Розрахунок магнітострикційної ультразвукової коливальної системи

Для перетворення електричної енергії в механічну енергію акустичних коливань використовуються магнітострикційні перетворювачі УЗК. Вони дозволяють ефективно перетворювати та випромінювати енергію великої інтенсивності, необхідну для інтенсифікації процесу тендеризації в зразках м'яса.

Повний розрахунок перетворювача УЗК, який дозволяє визначити вихідні параметри в залежності від вхідних, виконують, в основному, за стандартними методиками [134; 135].

Геометричний розрахунок перетворювача відбувається наступним чином. Вібратори магнітострикційних перетворювачів мають форму показану на рис. 6.1, табл. 6.1.

Попередньо з умови розміщення обмоток на стрижнях перетворювача ширина вікна приймається рівною 7 мм.

Тоді ширина стрижнів a буде дорівнювати

$$a = \frac{b - c}{2}, \quad (6.1)$$

$$a = \frac{22 \cdot 10^{-3} - 15 \cdot 10^{-3}}{2} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Товщина яра $d = 1,1 a = 8,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Приймаємо $d = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Знаходимо величину q

Таблиця 6.1.

Геометричні розміри перетворювача

a, мм	b, мм	c, мм	d, мм	h, мм
7.5	22	15	19	75

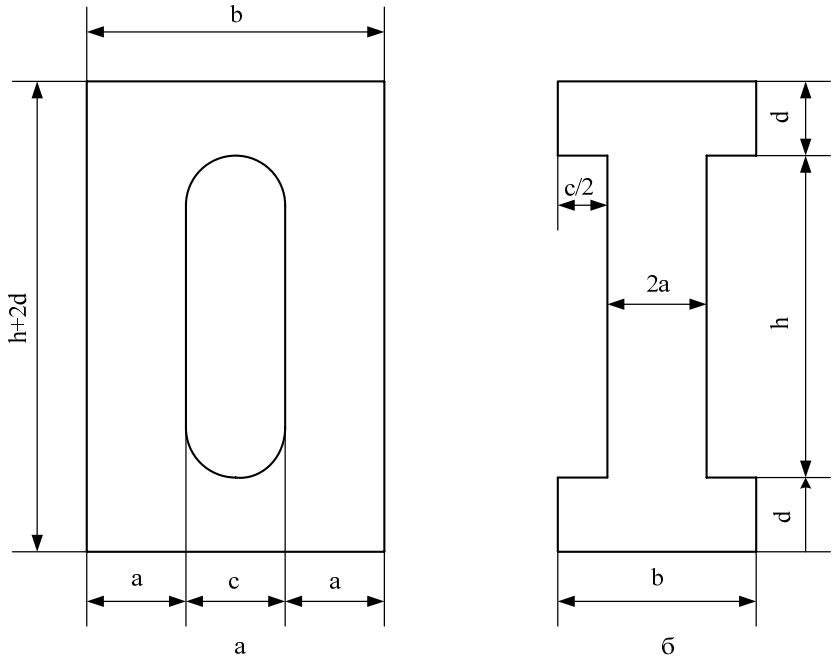


Рис. 6.1 Магнітострикційний перетворювач: а – двострижневий пакет; б – окрема секція

$$q = \frac{2a}{2a + c}, \quad (6.2)$$

$$q = \frac{2 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 10^{-3}} = 0,68 \text{ м.}$$

Довжина хвилі λ у матеріалі стрижня дорівнює

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (6.3)$$

$$\lambda = \frac{5,1 \cdot 10^5}{22 \cdot 10^3} = 0,232 \text{ м.}$$

де $c = 5.1 \cdot 10^5$ см/с - швидкість звуку в нікелевому стрижні.

Знаходимо величину α :

$$\alpha = \frac{4d}{\lambda}, \quad (6.4)$$
$$\alpha = \frac{4 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{0,232} = 0,142.$$

Визначаємо величину β за номограмою [136] $\beta = 0,78$, звідки висота стрижня h дорівнює

$$h = \frac{\beta \lambda}{2}, \quad (6.5)$$
$$h = \frac{0,78 \cdot 0,232}{2} = 0,056 \text{ м.}$$

Приймаємо $h = 56$ мм. Загальна довжина пакета h_1 буде дорівнювати

$$h_1 = h + 2 \cdot d, \quad (6.6)$$
$$h_1 = 0,056 + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 0,072 \text{ м.}$$

Знайдемо кількість витків N обмотки перетворювача з рівняння

$$N = \frac{U \cdot 10^8}{4,44 \cdot \beta_m \cdot S \cdot f}, \quad (6.7)$$
$$N = \frac{U \cdot 10^8}{4,44 \cdot \beta_m \cdot S \cdot f} = \frac{83 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 1000 \cdot 2,2^2 \cdot 26 \cdot 10^3} = 67,523.$$

де U – напруга на перетворювачі, В;

β_m – індукція в сердечнику, Гс;

S – площа поперечного перерізу стрижня перетворювача, см²;

f – частота, Гц.

Величини U і f визначаються параметрами генератора. Значення індукції в осердях магнітострикційних перетворювачів звичайно вибирається близько 1000 Гс, тому що при цих значеннях

використовується близько 0,25 кривій магнітострикції в її найбільш крутій висхідній частині [137].

Величина струму збудження при цьому дорівнює

$$I_{зб} = \frac{P_{ед}}{U}, \quad (6.8)$$
$$I_{зб} = \frac{700}{83} = 8,43 \text{ А.}$$

При частоті 26 кГц і амплітуді індукції близько 1000 Гс величина напруженості H_0 для обраного матеріалу становить 2500 А/м [138].

Визначимо ампер-витки обмотки підмагнічування

$$a \cdot W = 0,8 H_0 I_{ср}, \quad (6.9)$$

де $I_{ср}$ – середня довжина магнітопроводу.

$$I_{ср} = 4 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 3 \text{ м.}$$
$$a \cdot W = 0,8 \cdot 3 \cdot 2500 = 600 \text{ Ав.}$$

Тоді величину струму підмагнічування можна визначити з наступного рівняння:

$$I_{під} = \frac{a \cdot W}{N}, \quad (6.10)$$
$$I_{під} = \frac{a \cdot W}{N} = \frac{600}{68} = 8,86 \text{ А.}$$

Загальний струм, що протікає через обмотку, буде дорівнювати

$$I_{зар} = \sqrt{I_{під}^2 + I_{зб}^2}, \quad (6.11)$$
$$I_{зар} = \sqrt{8,43^2 + 8,86^2} = 12,25 \text{ А.}$$

Визначимо перетин дроту обмотки перетворювача

$$g = \frac{I_{\text{зар}}}{j}, \quad (6.12)$$

де j – густина струму в обмотці перетворювача $9 \cdot 10^6$ А/м².

$$g = \frac{12,25}{9 \cdot 10^6} = 1,36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Діаметр дроту визначається з рівняння

$$D_{\text{др}} = 2 \sqrt{\frac{g}{\pi}}, \quad (6.13)$$

$$D_{\text{др}} = 2 \sqrt{\frac{1,36 \cdot 10^{-6}}{3,14}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Для обмотки перетворювача використовується дріт, що забезпечує тривалу електричну міцність у водному середовищі, наприклад, типу БЛВЛ. Діаметр такого дроту в ізоляції складе $D_{\text{із}}=3,0$ мм.

Перевірка можливості розміщення обмотки на стрижнях перетворювача. Висота вікна $h=0,08$ м, коефіцієнт укладання $k=0,9$

$$N_0 = \frac{h}{D_{\text{із}} \cdot k}, \quad (6.14)$$

$$N_0 = \frac{0,08}{3,0 \cdot 0,9} = 67,59.$$

Отже, у вікні перетворювача обмотка може бути розміщена без ускладнень. Моделювання УЗКС методом електромеханічних аналогій наведено у додатку Д.4.

6.3. Розрахунок і проектування трансформаторів пружних коливальних і хвилеводів

Розрахункова формула для визначення геометричних розмірів елементів коливальної системи ультразвукових машин виводиться при

вирішенні диференціального рівняння поширення поздовжніх хвиль у стрижнях змінного перетину. Найбільше значення амплітуди зсуву відповідає резонансному режиму роботи коливальної системи, коли частота вільних коливань дорівнює частоті змушених коливань. Тому рішення полягає в знаходженні часткового рівняння, що пов'язує геометричні розміри стрижня й фізичні характеристики матеріалу, з якого він виготовлений, із частотою вільних коливань.

Таким чином, порядок розрахунку й проектування конічних східчастих трансформаторів і хвилеводів зводиться до наступного:

1. Визначається діаметр входу d_1 , що для трансформаторів пружних коливань дорівнює діагоналі пакета магнітострикційного перетворювача, а для хвилеводів – діаметру виходу трансформатора

$$d_1 = \sqrt{2S^2}, \quad (6.15)$$

$$d_1 = \sqrt{2 \cdot 22 \cdot 10^{-3}} = 35 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2. Попередньо призначаємо коефіцієнт підсилення в межах $5 \leq K_{\text{під}} \leq 10$. $K_{\text{під}} = 7$.

Тоді діаметр виходу буде дорівнює

$$d_2 = \frac{d_1}{K_{\text{під}}}, \quad (6.16)$$

$$d_2 = \frac{35 \cdot 10^{-3}}{7} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

3. Знаходимо резонансну довжину трансформатора

$$l_p = \frac{c}{2f}, \quad (6.17)$$

$$l_p = \frac{5,1 \cdot 10^5}{2 \cdot 26 \cdot 10^3} = 0,116 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

4. Знаходимо довжину плавного переходу від більшого перетину до меншого

$$l_{\text{п}} = 0,1 \cdot l_p, \quad (6.18)$$

$$l_{\text{п}} = 0,1 \cdot 0,116 \cdot 10^{-3} = 0,012 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

5. У випадку, якщо стрижень служить трансформатором пружних коливань, у вузлі зсуву передбачається діафрагма для кріплення коливальної системи до корпусу сорочки магнітострикційного пакета.

Діафрагма розташовується на відстані

$$l_1 = \frac{l_p}{2}, \quad (6.19)$$

$$l_1 = \frac{0.116 \cdot 10^{-3}}{2} = 0.058 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Товщину діафрагми l_d приймаємо рівною 5 мм; діаметр діафрагми

$$d_d = 1,3 \cdot d_1, \quad (6.20)$$

$$d_d = 1.3 \cdot 35 \cdot 10^{-3} = 45,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Схема трансформатора наведена на рис. 6.2. Для досягнення заданого значення акустичної потужності в заданому об'ємі діаметр вихідного торця хвилеводу $d_b = 15$ мм, діаметр вхідного кінця $d_3 = 10$ мм, коефіцієнт підсилення $k_{\text{під}} = 2$

Отже, найменший експоненційний діаметр

$$d_4 = \frac{d_3}{k_{\text{під}}} = 0,005 \text{ м.} \quad (6.21)$$

Знаходимо резонансну довжину хвилевода

$$l_p = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln k_y}{\pi} \right)^2}, \quad (6.22)$$

$$l_p = \frac{5.1 \cdot 10^5}{2 \cdot 22 \cdot 10^3} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln 2}{3.14} \right)^2} = 0,119 \text{ м.}$$

Знаходимо показник звуження експоненти

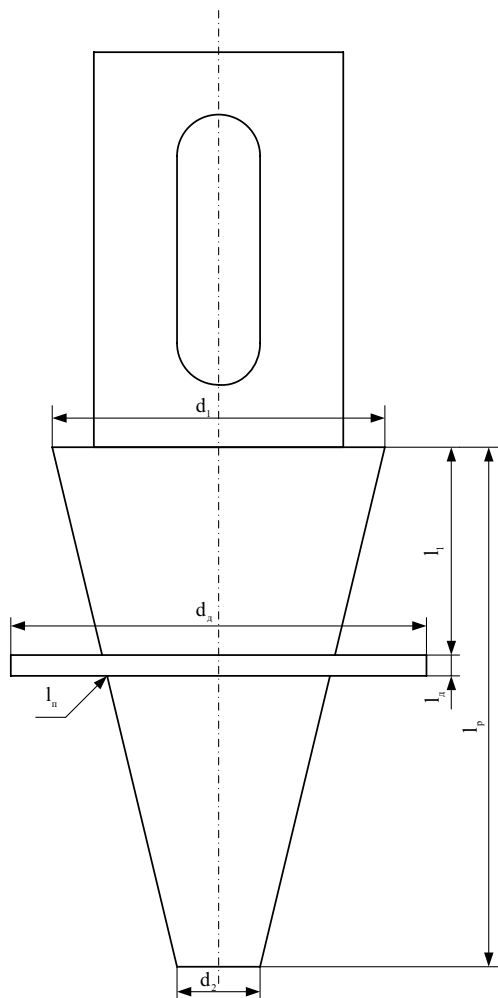


Рис. 6.2. Схема трансформатора пружинных колебаний

$$b = \frac{2}{1} \ln k_{\text{під}}, \quad (6.23)$$

$$b = \frac{2}{0.119} \ln 2 = 11,679.$$

Рівняння що описує профіль стрижня, рис.6.3:

$$d_x = d_0 \cdot \exp\left(\frac{-b}{2} \cdot x\right). \quad (6.24)$$

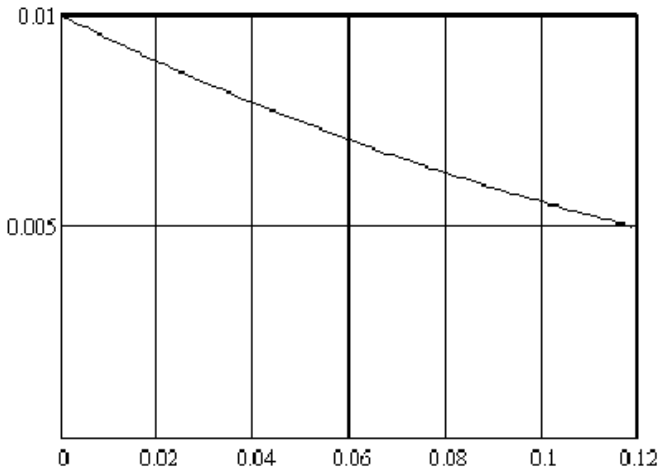


Рис. 6.3. Експоненційна крива що описує профіль стрижня

Для побудови профілю хвилеводу, відповідно до формули, зміни діаметра d_x від відстані x , рівної $1 \cdot 10^{-2}$ м розрахуємо табл. 6.2, та побудуємо рис. 6.4.

Таблиця 6.2

Розрахунковий профіль хвилеводу

$x, 10^{-2} \text{ м}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$d_x, 10^{-3} \text{ м}$	9,389	8,815	8,276	7,77	7,295	6,85	6,431	6,038	5,669	5,322

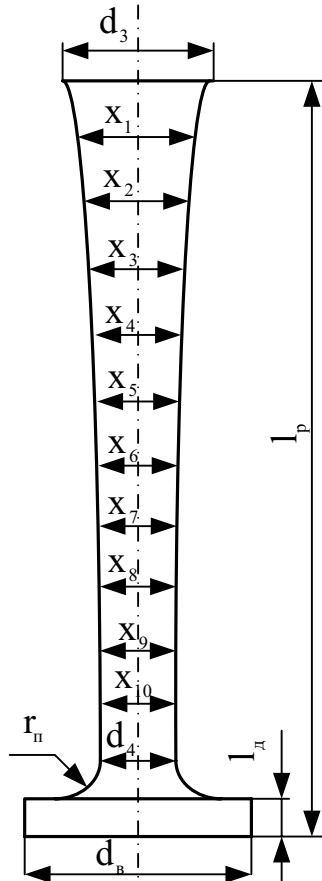


Рис. 6.4. Схема випромінювача з експоненційним переходом

Знаходимо радіус плавного переходу від більшого перетину до меншого

$$r_{\text{п}} = 0,1 \cdot l_{\text{р}}, \quad (6.25)$$

$$r_{\text{п}} = 0,1 \cdot 0,119 = 0,012 \text{ м.}$$

Товщину випромінювача $l_{\text{д}}$ приймаємо рівною $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Коливання частотою, нижче критичної, не можуть поширюватися в стрижні. Це пояснюється тим, що активна складова вхідного опору експонентного стрижня для біжучої хвилі, що біжить, пов'язана із критичною й робочою частотою наступним співвідношенням

$$R_{\text{а}} = S_0 \rho c \sqrt{1 - \frac{\omega_{\text{к}}^2}{\omega^2}} = S_0 \rho c \sqrt{1 - \frac{b^2 c^2}{16 \pi^2 f^2}}. \quad (6.26)$$

Із цього рівняння видно, що якщо підкореневе рівняння помітно відрізняється від одиниці, то вхідний опір буде істотно залежати від показника звуження b . Тому що експонентний хвилевід, з'єднаний із іншими елементами коливальної системи, що мають інше значення b , та за рахунок різниці вхідного й вихідного опорів двох стрижнів, що стикаються, у місці зіткнення буде відбуватися відбиття енергії. Щоб цього не відбулося, варто істотно перевищити критичну частоту, рекомендується робочу частоту [139; 140] вибирати з умови $f \geq 1.5 f_{\text{к}}$. Перевірні розрахунки перетворювача: механічний, деформацій, переміщень, напружень наведено в додатку Д [141; 142].

6.4. Розрахунок і проектування робочої камери апарата

З метою визначення геометричних розмірів робочої камери апарата, був проведений експеримент: в посудину з рідиною, у якій був розташований випромінювач, зверху потрохи насипали металеві ошурки. Під час роботи УЗ випромінювача в рідині спостерігалось турбулентне, досить інтенсивне переміщення кавітаційних потоків. Металеві ошурки підхvacувалися цими потоками та починали в них циркулювати (рис. 6.5). Відстань від випромінювача на якій металеві ошурки випадали в осадок була прийнята за радіус робочої камери, 60 мм.

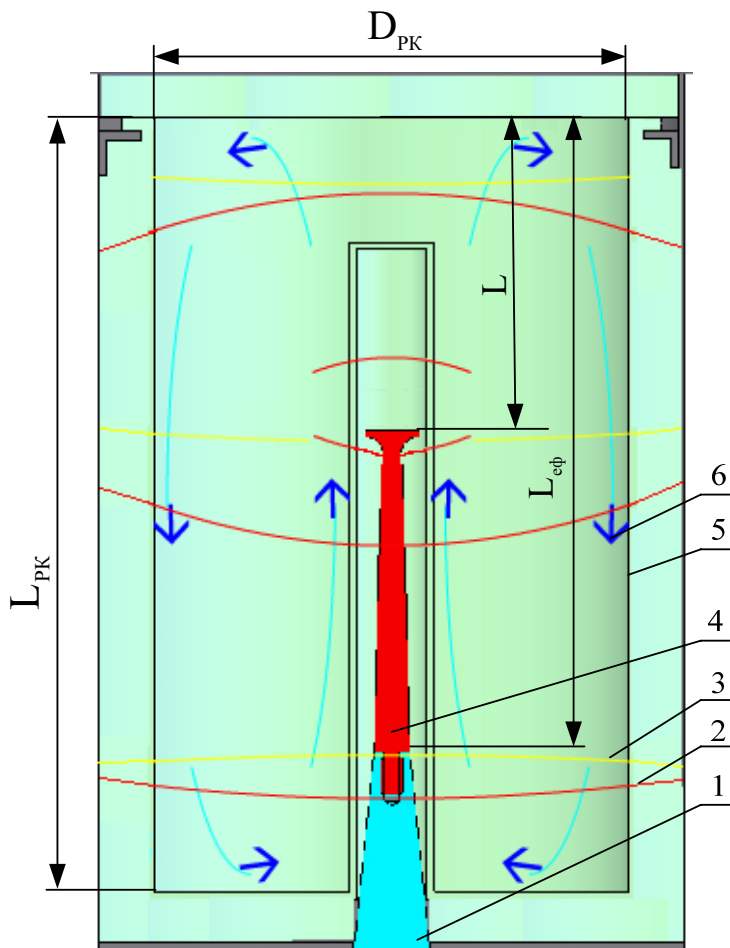


Рис. 6.5. Схема визначення геометричних розмірів робочої камери: 1 – концентратор; 2 – ультразвукова хвиля; 3 – відбита ультразвукова хвиля; 4 – випромінювач; 5 – робоча камера; 6 – кавітаційні потоки

Тобто діаметр робочої камери $D_{ПК} = 120$ мм, висота робочої камери $L_{ПК}$ визначалася за тією ж ознакою лише визначним розміром була

величина, на яку кавітаційні потоки підкидали металеві ошурки $L_{PK}=160$ мм. Конструкцією апарата робоча камера, в якій розташовується м'ясо є з'ємною у вигляді сітчастого кошика. Для зручності операцій з завантаження, вивантаження, геометричні розміри корпусу апарата проектуються більшими на 20 мм з усіх боків.

Під час проектування апарата з більшою кількістю випромінювачів, геометричні розміри робочої камери апарата та розташування випромінювачів потрібно вибирати таким чином щоб поля дії кавітаційних потоків перекривалися, як це зображено на рис. 6.6. За результатами досліджень та проектно-конструкторських розрахунків була розроблена проектно-конструкторська документація апарата для тендеризації м'яса за допомогою УЗК з ВВЗТ з визначенням його основних вихідних характеристик (додаток В).

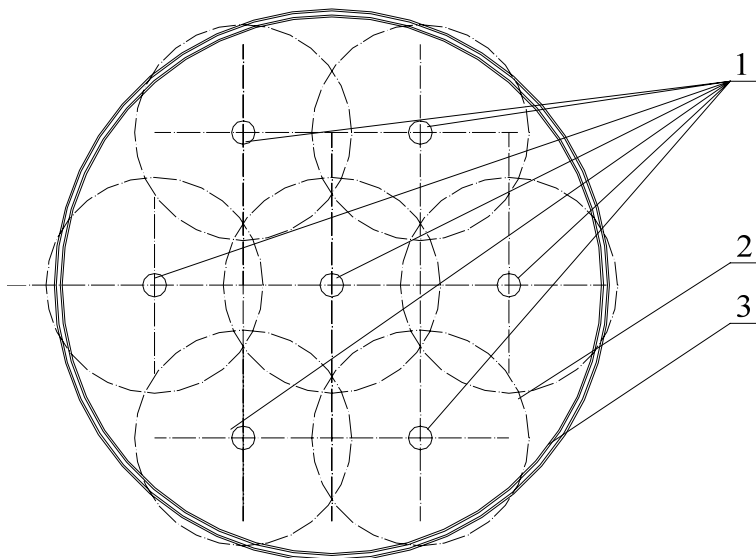


Рис. 6.6. Схема розташування випромінювачів в середині робочої камери: 1 – випромінювачі; 2 – поля дії кавітаційних потоків; 3 – робоча камера

Загальний вигляд апарата для ультразвукової тендеризації м'яса, спроектованого з використанням SolidWorks, наведено на рис. 6.7.

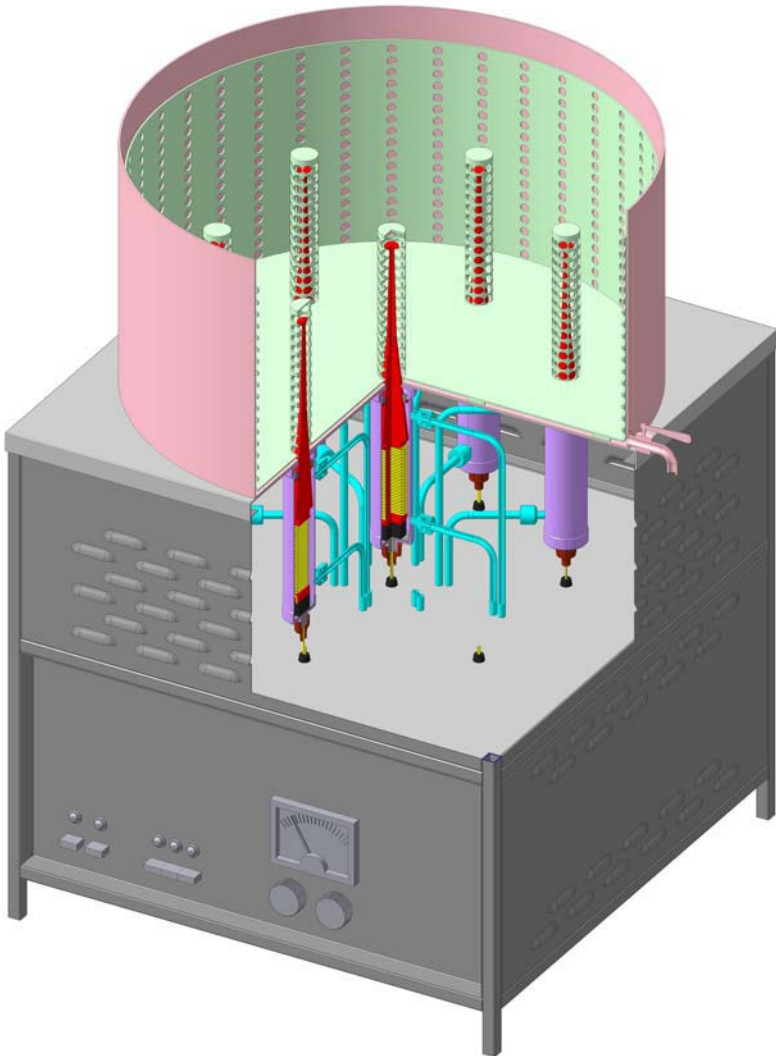


Рис. 6.7. Загальний вид апарата для тендеризації м'яса за допомогою УЗК

Таблиця 6.3

Технічні характеристики апарата для тендеризації м'яса за допомогою УЗК

Номінальна напруга живлення від мережі однофазного змінного струму частотою 50 Гц, В	220
Номінальна споживана електрична потужність, Вт	не більше 3500
Регулювання вихідної потужності	плавне
Номінальна робоча частота генератора й випромінювачів, кГц	22
Межі плавного регулювання частоти генератора, кГц	1,66
Амплітуда звукового тиску під час поширення в рідині, 10^5 Па	168
Тривалість одного циклу озвучування, хв	12...16
Напруга в коливальному контурі під час випромінювання в рідину, В	83
Сила струму в коливальному контурі під час випромінювання в рідину, А	7
Кількість випромінювачів, шт.	7
Об'єм робочої камери, м ³	0,14
Одноразове завантаження робочої камери, кг	60...80
Витрата води для охолодження випромінювачів, л/хв	не менш 0,5
Продуктивність установки кг/ год	240...320
Габаритні розміри ,мм	580x640x880
Маса, кг	120

Для визначення ефекту економії витрат енергетичних ресурсів апарату для тендеризації м'яса за допомогою ультразвуку порівняно з масажером Inject Star MC 400, за відомою методикою[143, 144] результати розрахунків наведені у таблиці 6.4. Величина річного енергоспоживання розраховується за наступною формулою

$$\sum E_{\text{сп}} = P_{\text{сп}} \cdot n_{\text{год}} \cdot n_{\text{днів}} \quad (6.27)$$

де $\sum E_{\text{сп}}$ – величина річного енергоспоживання, кВт·год;

$P_{\text{сп}}$ – споживана потужність апарату, кВт;
 $n_{\text{год}}$ – кількість годин роботи апарату, (8 годин в зміну, одна зміна в день);
 $n_{\text{днів}}$ – кількість робочих днів за рік, (240 днів)

Таблиця 6.4

Порівняльна характеристика апарату для тендеризації м'яса за допомогою УЗК

Показники	Апарат для тендеризації м'яса за допомогою УЗК	Вакуум-масажер Inject Star MC 400
Спожита потужність, P, Вт	3500	4600
Продуктивність, Q, кг/год	240...320	200...280
Питома енергоємність, ΔP , Вт/кг	10,93...14,58	16,42...23,00
Величина річного енергоспоживання, $\sum E_{\text{сп}}$, кВт·год	6720	8800

Розмір економічного ефекту, що виникає завдяки економії витрат енергетичних ресурсів на технологічні цілі визначений за формулою:

$$- 2080,0 \text{ кВт}\cdot\text{год} \cdot 0,35 = - 0,73 \text{ тис. грн.} \quad (6.28)$$

Проведені інженерні розрахунки з визначення основних характеристик та параметрів апарату для тендеризації м'яса за допомогою УЗК з ВВСТ, розрахунок на міцність УЗКС магнітострикційного перетворювача дозволили визначити конструкційні особливості, продуктивність апарату та його технічні характеристики. Апарат для тендеризації м'яса за допомогою УЗК має менші питомі енерговитрати та більше питома навантаження у порівнянні з іншими апаратами, дозволяє зробити висновок про енергоефективність його використання.

ДОДАТОК А
ПАТЕНТИ



УКРАЇНА

(19) (UA)

(11) 16116

(51) МПК (2006)
G01B 9/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ

Декларативний патент на корисну модель

видано відповідно до Закону України
"Про охорону прав на винаходи і корисні моделі"

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності



М. Паладій

(21) u 2006 02096

(22) 27.02.2006

(24) 17.07.2006

(46) 17.07.2006. Бюл. № 7

(72) Постнов Генадій Михайлович, Чеканов Микола Анатолійович, Дуб Володимир
Васильович, Червоний Віталій Миколайович

(73) ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ ПЕРЕМІЩЕНЬ

УКРАЇНА

УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 48063

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ТЕНДЕРИЗАЦІЇ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ ЗА
ДОПОМОГОЮ УЛЬТРАЗВУКУ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи
і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні
моделі 10.03.2010.

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

A handwritten signature in black ink, appearing to read "M.V. Paladiy".

М.В. Паладій



УКРАЇНА

UKRAINE



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 48064

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ СИЛИ РІЗАННЯ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 10.03.2010.

Голова Державного департаменту
інтелектуальної власності

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "M.V. Paladiy", is written over the printed name.

М.В. Паладій



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 71761

СПОСІБ ТЕНДЕРИЗАЦІЇ М'ЯСНОЇ СИРОВИНИ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.07.2012.

Перший заступник Голови
Державної служби
інтелектуальної власності України


О.В. Янов



ДОДАТОК Б
ПРОГРАМИ З ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ
ПАКЕТОМ MATHCAD

Визначення середньооб'ємної температури

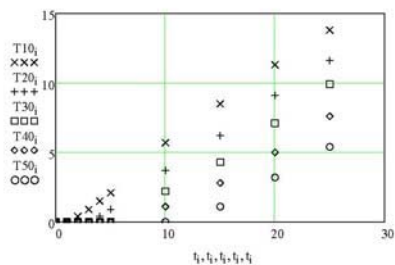
$$F(x, y, P, z) := \begin{cases} \text{for } n \in 0..P \\ X^{(n)} \leftarrow X^{(n-1)} \\ a \leftarrow (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \\ f \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..P \\ f \leftarrow f + a_i \cdot z^i \\ f \end{cases}$$

data := READPRN("Cyl_pog1_so_sr.txt")

t := data⁽⁰⁾

T10 := data⁽¹⁾ T20 := data⁽²⁾ T30 := data⁽³⁾ T40 := data⁽⁴⁾ T50 := data⁽⁵⁾

i := 0..rows(t) - 1



P10 := 4

P20 := 4

P30 := 4

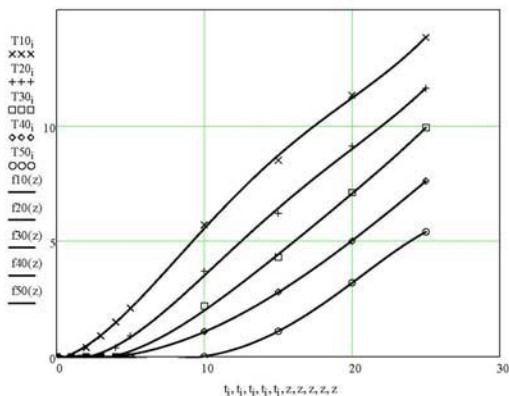
f10(z) := F(t, T10, P10, z)

f20(z) := F(t, T20, P20, z)

f30(z) := F(t, T30, P30, z)

P40 := 3 P50 := 4
 f40(z) := F(t,T40,P40,z) f50(z) := F(t,T50,P50,z)

z := 0, 0.5 .. max(t)



$$r1 := 25 \cdot 10^{-3} \quad r2 := 20 \cdot 10^{-3} \quad r3 := 15 \cdot 10^{-3} \quad r4 := 10 \cdot 10^{-3} \quad r5 := 5 \cdot 10^{-3}$$

$$V5 := \frac{4\pi \cdot r5^3}{3} \quad V4 := \frac{4\pi \cdot (r4^3 - r5^3)}{3} \quad V3 := \frac{4\pi \cdot (r3^3 - r4^3)}{3} \quad V2 := \frac{4\pi \cdot (r2^3 - r3^3)}{3}$$

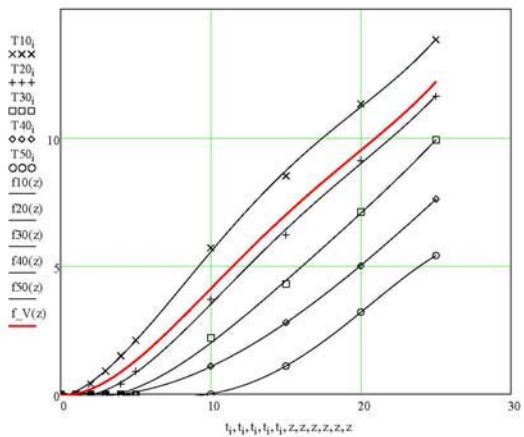
$$V1 := \frac{4\pi \cdot (r1^3 - r2^3)}{3} \quad V_{\text{common}} := \frac{4\pi \cdot r1^3}{3}$$

$$V1 = 3.194 \times 10^{-5} \quad V2 = 1.937 \times 10^{-5} \quad V3 = 9.948 \times 10^{-6} \quad V4 = 3.665 \times 10^{-6}$$

$$V5 = 5.236 \times 10^{-7} \quad V_{\text{common}} = 6.545 \times 10^{-5}$$

$$V1 + V2 + V3 + V4 + V5 = 6.545 \times 10^{-5}$$

$$f_V(z) := \frac{1}{V_common} \cdot (V1 \cdot f1(z) + V2 \cdot f2(z) + V3 \cdot f3(z) + V4 \cdot f4(z) + V5 \cdot f5(z))$$

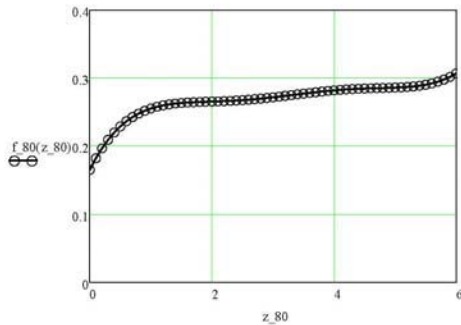


Визначення структурномеханічних показників м'яса

h := 8

$$F(x, y, P, z) := \begin{cases} \text{for } n \in 0..P \\ X^{(n)} \leftarrow x^n \\ a \leftarrow (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot y \\ f \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..P \\ f \leftarrow f + a_i \cdot z^i \\ f \end{cases} \quad DX(\text{data}) := \begin{cases} y \leftarrow \text{data}^{(0)} \\ y^0 \leftarrow y_0 \\ y \leftarrow (y - y_0) \cdot \frac{1}{33} \cdot \frac{1}{h} \end{cases}$$

```
data_80 := READPRN("80.txt")
dx_80 := DX(data_80)
t_80 := (data_80)^(1) / 10      P_80 := 5
z_80 := 0, 0.1 .. max(t_80)
i_80_2 := 0, 4 .. rows(dx_80) - 1
f_80(z) := F(t_80, dx_80, P_80, z)
```



```

data_80 := READPRN("80.txt")
dx_80 := DX(data_80)
t_80 := data_80[1]

i_80_2 := 0,4..rows(dx_80) - 1

k1 := 0..10
k2 := 0..100

t1_k1 := t_80_k1    dx1_k1 := dx_80_k1
t2_k2 := t_80_rows(dx_80)-2-k2

a1 := intercept(t1,dx1)    b1 := slope(t1,dx1)
f1(x) := a1 + b1*x

dx2_k2 := dx_80_rows(dx_80)-2-k2
a2 := intercept(t2,dx2)    b2 := slope(t2,dx2)
f2(x2) := a2 + b2*x2

KG :=  $\frac{a2}{0.163}$     KG = 1.435    x2 := 0..60

```

$$\underline{m} := 40 \cdot 10^{-3} \quad \underline{g} := 9.8 \quad \underline{S} := 15 \cdot 10^{-4}$$

$$\underline{T} := \frac{m \cdot g}{S} \quad T = 261.333$$

$$I := \frac{0.163}{T} \quad I = 6.237 \times 10^{-4}$$

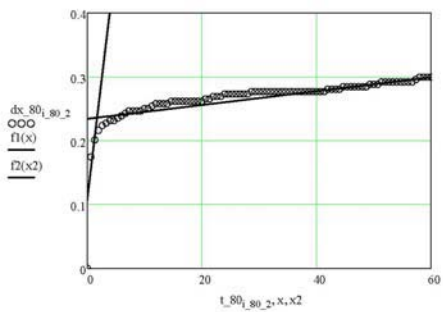
$$Gpr := \frac{T}{a1} \quad Gpr = 2.484 \times 10^3$$

$$Gel := \frac{T}{a2 - a1} \quad Gel = 2.031 \times 10^3$$

$$ViscPL := \frac{T}{b2} \quad ViscPL = 2.414 \times 10^5$$

$$ViscPR := \frac{T}{b1} \quad ViscPR = 3.504 \times 10^3$$

	0
0	0
1	0.155
2	0.17
3	0.167
4	0.174
5	0.186
6	0.186
7	0.197
8	0.201
9	0.201
10	0.205
11	0.208
12	0.216
13	0.216
14	0.216
15	...



ДОДАТОК В
ТЕХНІЧНИЙ ОПИС ТА ІНСТРУКЦІЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Міністерство освіти та науки України

Харківський державний університет харчування та торгівлі

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи

 В.М. Михайлов

(підпис)

(ініціали, прізвище)

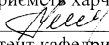
" 28 " 12 2010 р.

ТЕХНІЧНИЙ ОПИС
ТА ІНСТРУКЦІЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ

апарата для тендеризації м'яса з великим вмістом з'єднувальної тканини за
допомогою ультразвуку
(проект)

РОЗРОБЛЕНО

к.т.н., професор кафедри устаткування
підприємств харчування ХДУХТ

 Г.М. Постнов
асистент кафедри енергетики та фізики
ХДУХТ

 М.А. Чеканов

Харків 2010

ЗМІСТ

	стор.
1. Вступ	3
2. Призначення	3
3. Технічні характеристики	4
4. Комплектація виробу	4
5. Комплектація та робота тендеризатора	5
6. Конструкція та робота складових частин тендеризатора	6
7. Тара і пакування	11
8. Загальні вимоги з експлуатації	11
9. Вимоги з техніки безпеки	12
10. Порядок установки та підготовка до роботи	13
11. Порядок роботи	14
12. Правила зберігання і догляд за тендеризатором	15

					ЦФ 1.455.001. ТО			
Вид	Аркуш	№ докум	Прізвище	Дата	Аварій для тендеризації м'яси з великою ємністю з'єднувальної тяганини за допомогою ультразвуку УАТМ-1 технічний опис та інструкція з експлуатації	Лист	Аркуш	Аркушів
Групування	Чеканів		<i>[Signature]</i>			1	2	15
Перевіряє	Постинів		<i>[Signature]</i>					
Н. Кошар.								
Затв.								

3. ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Номінальна напруга живлення від мережі однофазного змінного струму частотою 50 Гц, В	220
Номінальна споживана електрична потужність, Вт	не більше 3500
Регулювання вихідної потужності	плавне
Номінальна робоча частота генератора й випромінювачів, кГц	22
Межі плавного регулювання частоти генератора, кГц	1,66
Амплітуда звукового тиску під час поширення в рідині, бар	168
Тривалість одного циклу озвучування, хв	12...16
Напруга в коливальному контурі під час випромінювання в рідину, В	83
Сила струму в коливальному контурі під час випромінювання в рідину, А	7
Кількість випромінювачів, шт.	7
Об'єм робочої камери, м ³	0,14
Одноразове завантаження робочої камери, кг	60...80
Витрата води для охолодження випромінювачів, л/хв	не менш 0,5
Продуктивність установки кг/ год	240...320
Габаритні розміри ,мм	580x640x880
Маса, кг	120

4. КОМПЛЕКТАЦІЯ ВИРОБУ

Комплект виробу містить:	
Генератор ультразвуковий	1 шт.;
Комплект випромінювачів	7 шт.;
Стійка апарата	1 шт.;
Робоча камера апарата	1 шт.;
Сітчастий кошик	2 шт.;
Експлуатаційні документи	1 екз.

						Аркуш
						4
Вим.	Аркуш	№ докум	Після	Дата	ЦФ 1.455.001. ТО	

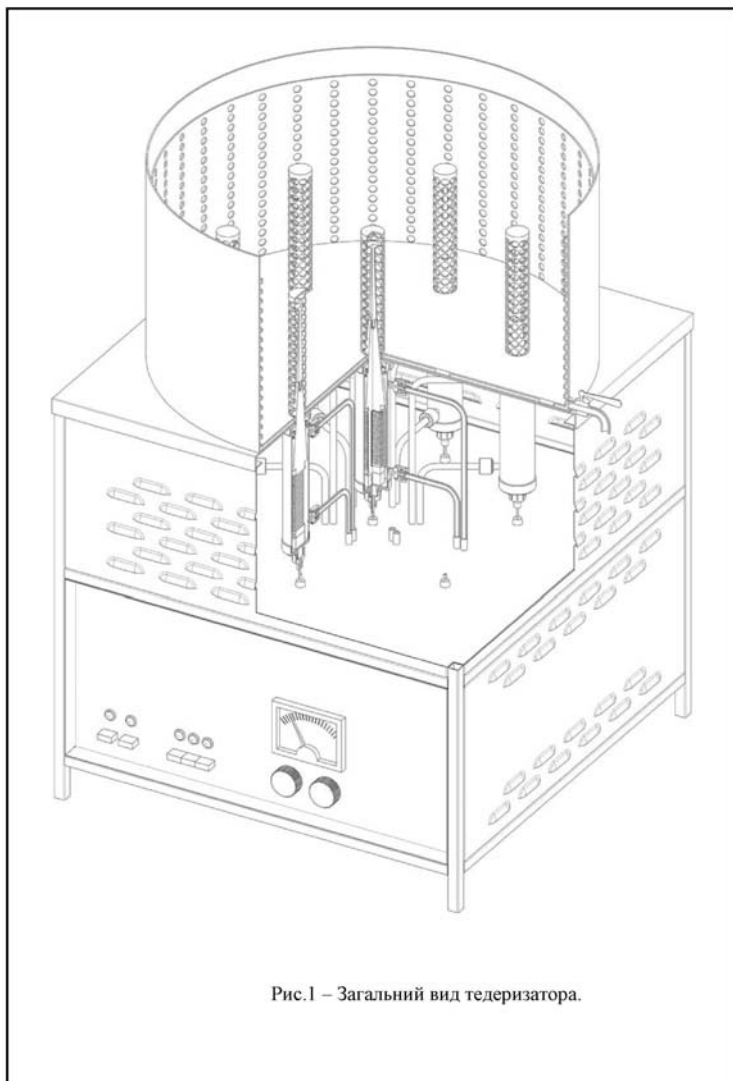


Рис.1 – Загальний вид тедеризатора.

						Аркуш
					ЦФ 1.455.001. Т0	6
Вим.	Аркуш	№ докум	Піятис	Дата		

ДОДАТОК Д
РОЗРАХУНКИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ
УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

ДОДАТОК Д.1
РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ УЗКС

Γ

$$\begin{aligned}
c &:= 1550 & \rho &:= 1080 & A &:= 70 \cdot 10^{-6} \\
f &:= 22 \cdot 10^3 & S &:= \frac{\pi \cdot (15 \cdot 10^{-3})^2}{4} \\
S &= 1.767 \times 10^{-4}
\end{aligned}$$

$$\lambda := \frac{c}{f} \quad \lambda = 0.07$$

$$\omega := (2 \cdot \pi \cdot f) \quad \omega = 1.382 \times 10^5$$

$$V := A \cdot \omega \quad V = 9.676$$

$$B := -[A \cdot (\omega)^2] \quad B = -1.338 \times 10^6$$

$$E_k := \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot A^2 \quad E_k = 2.528 \times 10^4$$

$$E_p := \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad E_p = 5.056 \times 10^4$$

$$F := 1 \cdot 2 \cdot \rho \cdot c \cdot V^2 \quad F = 3.135 \times 10^8$$

$$E_{vip} := F \cdot S \quad E_{vip} = 5.539 \times 10^4$$

$$D := \rho \cdot c \cdot V \quad D = 1.62 \times 10^7$$

$$dD := \frac{2 \cdot \rho}{\pi} \cdot B \quad dD = -9.196 \times 10^8$$

$$Q := \frac{D}{A} \quad Q = 2.314 \times 10^{11}$$

$$RA := \frac{D}{V} \quad RA = 1.674 \times 10^6$$

$$k := 1.1$$

$$S_s := (1 + k) \cdot E_p \quad S_s = 1.062 \times 10^5$$

$$c_1 := 1430 \quad c_2 := 1550$$

$$\rho_1 := 1000 \quad \rho_2 := 1080$$

$$RA_1 := \rho_1 \cdot c_1 \quad RA_1 = 1.43 \times 10^6$$

$$RA_2 := \rho_2 \cdot c_2 \quad RA_2 = 1.674 \times 10^6$$

$$G := \frac{RA_2 - RA_1}{RA_1 + RA_2}$$

$$G = 0.079 \quad \eta := 10^6$$

$$\Gamma := 1 - G$$

$$\Gamma = 0.921$$

$$alf_1 := \frac{8 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot \eta}{3 \cdot c_1^3 \cdot \rho_1}$$

$$alf_1 = 4.356 \times 10^3$$

$$alf_2 := \frac{0.03 \cdot f}{\eta}$$

$$alf_2 = 6.6 \times 10^{-4}$$

$$alf_1 + alf_2 = 4.356 \times 10^3$$

ДОДАТОК Д.2
МЕХАНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ВИПРОМІНЮВАЧА

Материал сердечника	НИКЕЛЬ
Марка	Н-2
$l_1 := 0.01$	длина крайних стержней, м
$l_2 := 0.076$	длина среднего стержня, м
$S_1 := 0.000484$	площадь поперечного сечения крайних стержней, м ²
$S_2 := 0.000184$	площадь поперечного сечения среднего стержня, м ²
$c := 4900$	скорость звука в материале преобразователя, м/с
$f := 22000$	заданная частота преобразователя, Гц
$Q := 70$	добротность материала
$\rho := 8900$	плотность материала, кг/м ³
$\alpha_1 := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_1}{c}$	волновые размеры преобразователя, рад
$\alpha_1 = 0.282$	
$\alpha_2 := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot l_2}{c}$	волновые размеры преобразователя, рад
$\alpha_2 = 2.144$	

Расчёт сопротивления механических потерь

$$PP := \pi - 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{S_1}{S_2} \cdot \tan(\alpha_1)\right)$$

$$OO := \frac{\rho \cdot c \cdot S_2}{2 \cdot Q}$$

$$TT := \cos(\alpha_1)^2 + \frac{(S_1)^2}{(S_2)^2} \cdot \sin(\alpha_1)^2$$

$$R_2 := OO \cdot \left(2 \cdot \alpha_1 + PP \cdot \frac{S_2}{S_1} \cdot TT\right)$$

$$R_2 = 90.784$$

сопротивление механических потерь, Ом

Расчёт активной составляющей сопротивления нагрузки

$l := 5.6$ длина обмотки, м

$d := 0.75 \cdot 10^{-3}$ диаметр провода обмотки, м

$t_{20} := 20$ температура, при которой известно удельное сопротивление материала обмотки (медь), °C

$t_{70} := 70$ температура для которой рассчитывается удельное сопротивление материала обмотки (медь), °C

$\rho_{20} := 1.673 \cdot 10^{-8}$ удельное сопротивление материала при известной температуре, Ом*м

$\beta := 4.30 \cdot 10^{-3}$ температурный коэффициент, °C⁻¹

$\rho_{70} := \rho_{20} [1 + \beta \cdot (t_{70} - t_{20})]$

$\rho_{70} = 2.033 \times 10^{-8}$ удельное сопротивление температуры для рассчитываемой температуры, Ом*м

$R_1 := \rho_{70} \cdot \frac{4 \cdot l}{\pi \cdot d^2}$ активная составляющая сопротивления нагрузки, Ом

$R_1 = 0.258$

Расчёт амплитуды колебаний

$\sigma_1 := 35 \cdot 10^5$ амплитуда магнитострикционных напряжений, Н/м²

$\epsilon_1 := \frac{\sigma_1 \cdot S_2 \cdot \cos(\alpha_1)}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (R_1 + R_2)}$ амплитуда колебаний рабочего торца, м

$\epsilon_1 = 4.915 \times 10^{-5}$

Определяющие величины

$l_1 := 0.01$ длина крайних стержней, м

$l_2 := 0.076$ длина среднего стержня, м

$S_1 := 0.000484$	площадь поперечного сечения крайних стержней, м^2
$S_2 := 0.000184$	площадь поперечного сечения среднего стержня, м^2
$c := 4900$	скорость звука в материале преобразователя, м/с
$f := 22000$	заданная частота преобразователя, Гц
$Q := 70$	добротность материала
$\rho := 8900$	плотность материала, кг/м^3
$l := 5.6$	длина обмотки, м
$d := 0.75 \cdot 10^{-3}$	диаметр провода обмотки, м
$\rho_{20} := 1.673 \cdot 10^{-8}$	удельное сопротивление материала при известной температуре, $\text{Ом}\cdot\text{м}$
$\beta := 4.30 \cdot 10^{-3}$	температурный коэффициент, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\sigma_1 := 35 \cdot 10^5$	амплитуда магнитострикционных напряжений, Н/м^2

ДОДАТОК Д.3
МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНЬ, ДЕФОРМАЦІЙ, ПЕРЕМІЩЕНЬ
РОЗРАХОВАНОГО ВИПРОМІНЮВАЧА В COSMOSWORKS

Анализ напряжения Излучатель

1. [Введение](#)
2. [Информация о файле](#)
3. [Материалы](#)
4. [Информация о нагрузке и ограничении](#)
5. [Свойство упражнения](#)
6. [Контакт](#)
7. [Результаты](#)
8. [Приложение](#)

1. Введение

Подвести итог анализа FEM на Излучатель

ПРИМЕЧАНИЕ.

Не следует основывать ваши проектные решения исключительно на данных, представленных в этом отчете. Используйте эту информацию совместно с экспериментальными данными и практическим опытом. Испытания в условиях эксплуатации обязательны для утверждения окончательного проекта. COSMOSWorks помогает уменьшить время продвижения на рынок путем снижения, но не упразднения испытаний в условиях эксплуатации.

2. Информация о файле

Имя модели:	Излучатель
Местоположение модели:	D:\Излучатель модель\Излучатель.SLDASM
Местоположение результатов:	C:\Program Files\SolidWorks\COSMOS\work
Имя упражнения:	Упражнение 1 (-По умолчанию-)

3. Материалы

№.	Имя детали	Материал	Масса	Объем
1	Конус-1	[SW]Литая легированная сталь	0.669447 kg	9.17051e-005 m ³
2	Насадка-1	[SW]Титаний	0.0251973 kg	5.47768e-006 m ³

4. Информация о нагрузке и ограничениях

Ограничение	
Ограничение-1 <Конус-1>	вкл 1 Грани в зафиксированном состоянии.
Описание:	

Нагрузка		
Давление-1 <Насадка-1>	вкл 1 Грани с давлением 5800 N/m ² в направлении, перпендикулярном выбранной грани	Последовательное нагружение
Описание:		

5. Свойство упражнения

Информация о сетке	
Тип сетки:	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение:	Стандартный
Автоматическое уплотнение сетки:	Выкл
Сглаживание поверхности:	Вкл
Проверка Якобиана:	4 Points
Размер элемента:	4.599 mm
Допуск:	0.22995 mm
Качество:	Высокая
Количество элементов:	10682
Количество узлов:	18198
Время для завершения сетки (часы;минуты;секунды):	00:00:04
Имя компьютера:	NOROV
Информация о решающей программе	
Качество:	Высокая
Тип решающей программы:	FFEPlus
Параметр:	Включить тепловые эффекты
Термальный параметр:	Исходная температура
Термальный параметр:	Справочная температура при нулевой деформации: 298 Kelvin

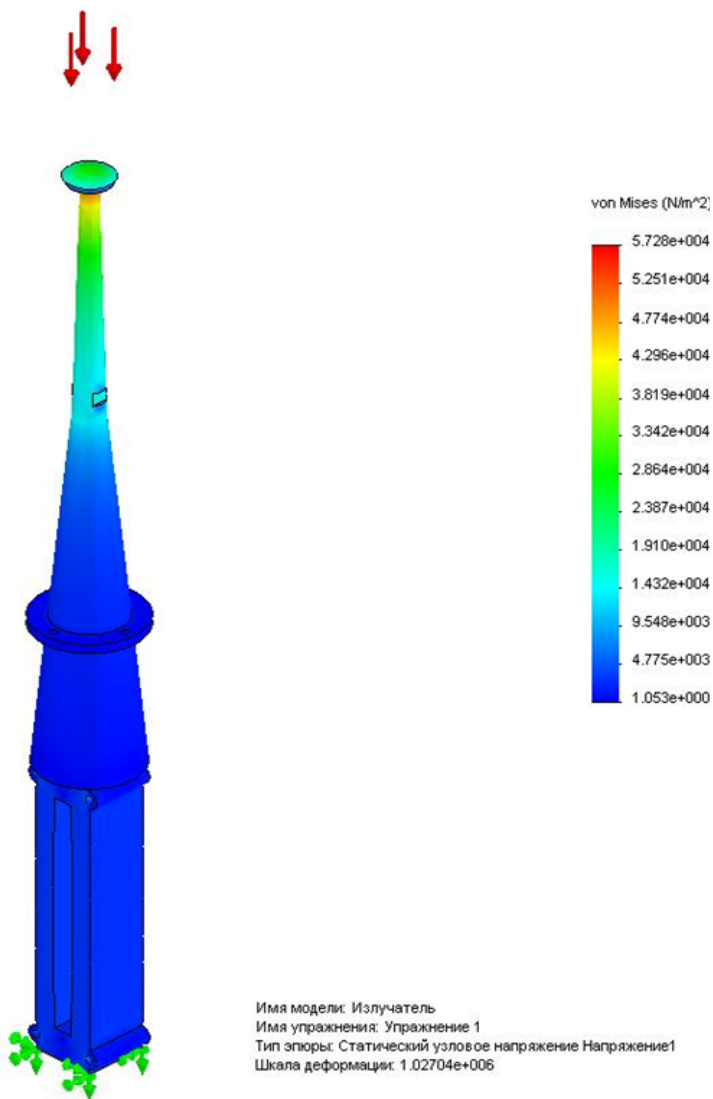
6. Контакт

Состояние контакта: Соприкасающиеся грани -
Связанные

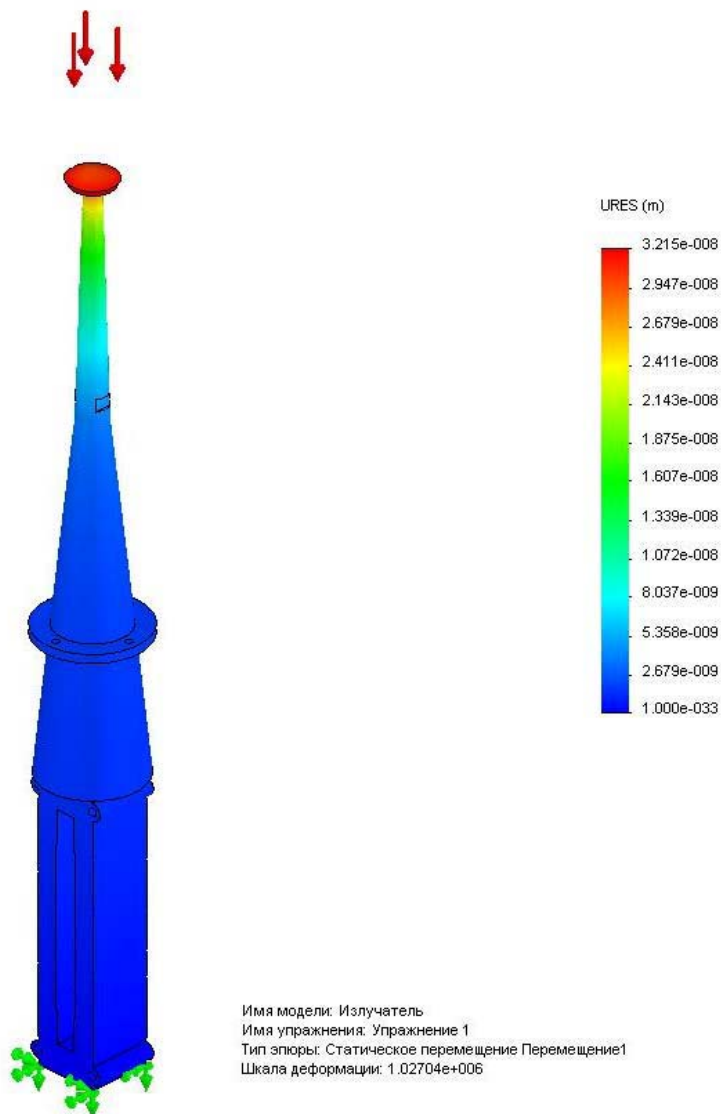
7. Результаты

Имя	Тип	Мин	Место	Макс	Место
Напряжение1	VON: Напряжение Von Mises	1.05269 N/m^2 Узел: 16161	(-29.456 mm, -71.5564 mm, 0.95435 mm)	57284.6 N/m^2 Узел: 15817	(- 29.3802 mm, -183.07 mm, -2.5 mm)
Перемещение1	URES:Результиру- ющее перемеще- ние	0 m Узел: 1234	(- 40.3802 mm, 139.804 mm, 11 mm)	3.21465e- 008 m Узел: 15954	(- 29.3802 mm, - 190.196 mm, 7.5 mm)
Деформация1	ESTRN: Эквивалентная деформация	5.95661e- 012 Элемент: 9829	(-29.918 mm, -71.2086 mm, 0.613364 mm)	3.98037e- 007 Элемент: 10107	(- 30.4752 mm, - 182.301 mm, 1.36862 mm)

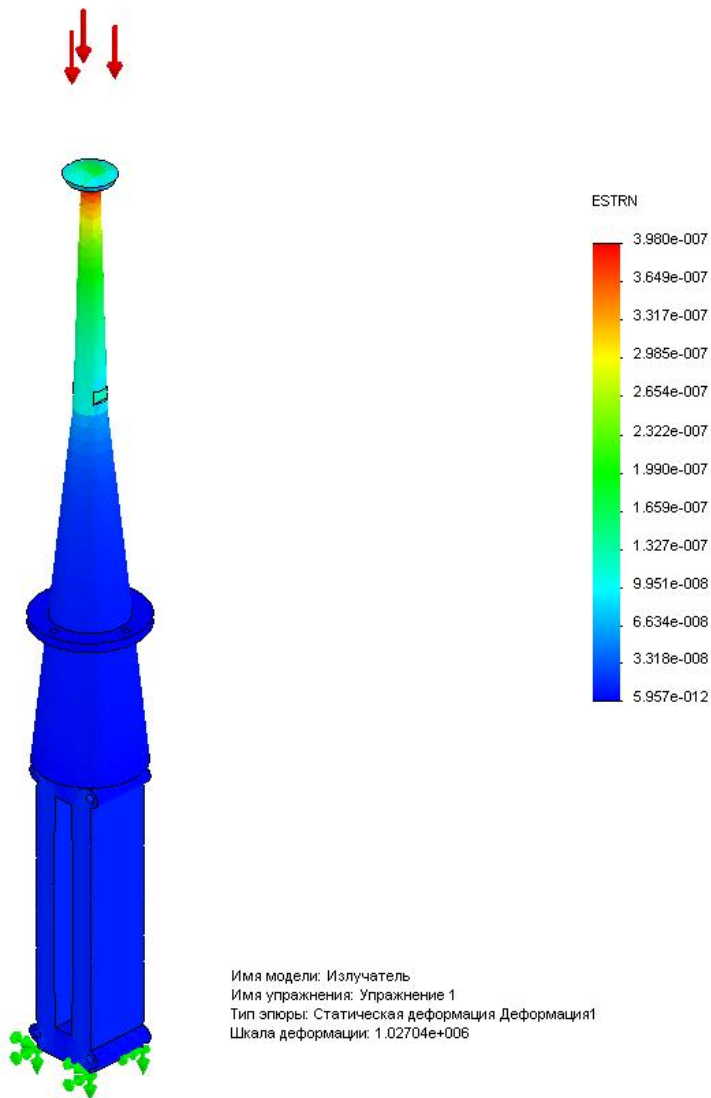
Излучатель- Напряжение1



Излучатель- Перемещение1



Излучатель- Деформация1



Имя материала:	[SW]Литая легированная сталь
Описание:	
Источник материала:	Использованные материалы SolidWorks
Имя библиотеки материалов:	Материалы Solidworks
Тип модели материала:	Линейный Упругий Изотропный

Имя свойства	Значение	Единицы измерения	Тип значения
Модуль упругости	1.9e+011	N/m ²	Постоянный
Коэффициент Пуассона	0.26	NA	Постоянный
Модуль сдвига	7.8e+010	N/m ²	Постоянный
Массовая плотность	7300	kg/m ³	Постоянный
Предел прочности при растяжении	4.4808e+008	N/m ²	Постоянный
Предел текучести	2.4128e+008	N/m ²	Постоянный
Коэффициент теплового расширения	1.5e-005	/Kelvin	Постоянный
Теплопроводность	38	W/(m.K)	Постоянный
Удельная теплоемкость	440	J/(kg.K)	Постоянный

Имя материала:

[SW]Титаний

Источник материала:

Использованные материалы SolidWorks

Имя библиотеки материалов:

solidworks materials

Тип модели материала:

Линейный Упругий Изотропный

Имя свойства	Значение	Единицы измерения	Тип значения
Модуль упругости	1.1e+011	N/m ²	Постоянный
Коэффициент Пуассона	0.3	NA	Постоянный
Модуль сдвига	4.3e+010	N/m ²	Постоянный
Массовая плотность	4600	kg/m ³	Постоянный
Предел прочности при растяжении	2.35e+008	N/m ²	Постоянный
Предел текучести	1.4e+008	N/m ²	Постоянный
Коэффициент теплового расширения	9e-006	/Kelvin	Постоянный
Теплопроводность	22	W/(m.K)	Постоянный
Удельная теплоемкость	460	J/(kg.K)	Постоянный

ДОДАТОК Д.4
МОДЕЛЮВАННЯ УЗКС МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ
АНАЛОГІЙ

Оскільки УЗКС пов'язана з джерелом живлення – генератором - то вона є для цього джерела деяким механічним опором - імпедансом. Механічний опір за допомогою магнітострикційного перетворювача, що входить до складу коливальної системи, перетворюється в еквівалентний електричний опір, приведений до виходу генератора електричних коливань УЗ частоти. Цей вхідний опір, у загальному випадку, є комплексним. Його величина залежить від параметрів системи, навантаження на її кінцях і частоти. Знання активної частини цієї величини дає можливість визначення всіх коливальних величин. Знання уявної частини вхідного опору дозволяє визначати резонансні частоти системи або визначити необхідні умови, що забезпечують налаштування системи на резонанс.

Щоб встановити зв'язок взаємного впливу параметрів оброблюваного технологічного середовища і властивостей перетворювача для пошуку оптимальних режимів дії на технологічне середовище, необхідно побудувати модель електроакустичного тракту перетворення електричної енергії на УЗ енергію. Оскільки для збудження УЗ коливань в середовищі використовується електричний генератор, який живить магнітострикційний перетворювач УЗКС, то при проведенні вимірювань не слід виходити за межі електричних вимірювань (не треба проводити будь яких фізичних вимірювань параметрів середовища і коливальної системи). Ще одним позитивним моментом запропонованого способу є можливість скористатися добре розробленою теорією електричних аналогій. Отже, найдоцільніше представити модель УЗКС у вигляді еквівалентної електричної схеми, яка будувється на основі системи електромеханічних аналогій. Модель може бути побудована на основі схеми заміщення магнітострикційних коливальних систем. Це дозволяє отримати схему заміщення - фізичну еквівалентну схему магнітострикційної коливальної системи на електричних пасивних компонентах, представлену на рис. Д.4.1. Найбільш важливим елементом схеми є послідовне коло R_H , C_0 , L_0 , яке відображає резонансні властивості перетворювача під час передачі активної електричної енергії через опір R_H у навколишнє середовище. Розгалуження R_1 , L_1 являє собою споживача активної й реактивної потужності холостого ходу й втрач на гістерезис у матеріалі сердечника на різних частотах механічного резонансу, що з'являється під час роботи випромінювача.

Основними характеристиками випромінювача є: відносна зміна геометричних розмірів стрижня випромінювача; довжина стрижня; ізоляційна стійкість. Тому ефективніше збуджувати котушку магнітострикційного перетворювача, в основному, шляхом дії джерела струму, а не джерела напруги. Саме цим вимогам відповідає джерело живлення на базі генератора з напівпровідниковим розрядним ключем, легко

керуваними по струму навантаження й часу його дії.

Для найбільш ефективного використання конкретного магніострикційного перетворювача необхідно визначити його основні параметри.

Активний опір обмотки R_1 нескладно визначити й в експериментах. Ця величина виявлялася в межах $0,05 \dots 0,1$ Ом. Для визначення індуктивного реактивного опору на частоті 50 Гц був використаний метод амперметра - вольтметра. Експериментально ця величина склала $0,9$ Ом.

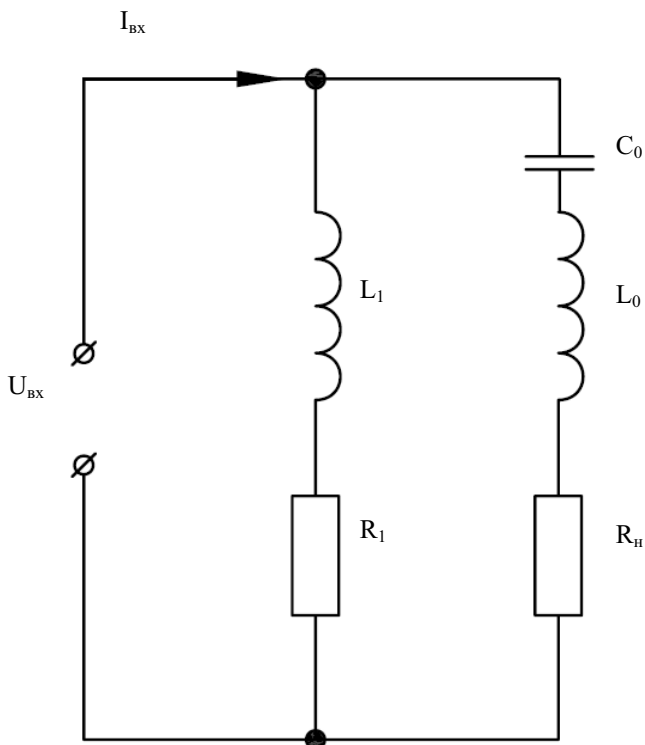


Рис. Д.4.1. Еквівалентна електрична схема магніострикційного перетворювача

Визначення активного опору навантаження магнітострикційного перетворювача на частоті резонансу проводилося за допомогою моделювання електричного процесу в програмі Electronics Workbench. Враховуючи значну величину реактивного опору X_1 , величина R_H визначиться з виразу для модулів паралельних активного й реактивного опорів:

$$z_0 = \frac{R_H X_1}{\sqrt{R_H^2 X_1^2}}, \quad (\text{Д.4.1})$$

де z_0 – модуль еквівалентного опору (рис. Д.4.1). З формули (1) опір R_H складе:

$$R_H = \frac{z_0 X_1}{\sqrt{X_1^2 - z_0^2}}, \quad (\text{Д.4.2})$$

Реактивні параметри зручніше визначити на частоті 2,0 кГц, з якої починається звукове збудження магнітостриктора, а характеристики магнітострикційного перетворювача можна вважати лінійними аж до 40,0 кГц із реальними рівнями сигналу збудження. Розглянувши еквівалентну схему магнітострикційного перетворювача, яка містить реактивний опір X_1 , включений паралельно еквівалентному конденсатору C_E , у реактивному опорі якого X_{CE} , врахований реактивний опір еквівалентної індуктивності L_0 й еквівалентної ємності C_0 , і з урахуванням R_H , одержимо:

$$X_{CE} = \frac{2X_L |z_2|^2 \pm \left[4X_L^2 |z_2|^4 - 4(|z_2|^2 - X_L^2) \left(|z_2|^2 (R_0^2 + X_L^2) - R_0^2 X_L^2 \right) \right]^{1/2}}{2(|z_2|^2 - X_L^2)}. \quad (\text{Д.4.3})$$

де $|z_2|$ – модуль повного опору електричного кола:

X_L – опір рівний $40 X_1$ (тому що X_1 визначено на частоті 50 Гц, а X_{CE} визначається на частоті 2 кГц). Оскільки на частоті 2,1 кГц опір конденсатора C_0 більше реактивного опору котушки L_0 в 25 разів (по

відношенню частот резонансу 10,5 кГц і робочої - 2,1 кГц), отже

$$X_{L_0} = \frac{X_{CE}}{24} \text{ та } X_{C_0} = \frac{25}{24} X_{CE}.$$

Під час проектування та розрахунку параметрів випромінювачів, для встановлення аналітичних залежностей між площею робочої поверхні інструмента й власною робочою частотою ультразвукової коливальної системи теж використовують еквівалентну електричну схему коригувального фільтра, що представляє собою послідовний резонансний електричний коливальний контур. Цей електричний коливальний контур складається з послідовно включених активного опору власних втрат R_H , індуктивності дроселя L_0 і електричної ємності магнітострикційних елементів C_0 . Параметри контуру на практиці легко вимірюються за методиками МЕК. У такій схемі включення коригувальний фільтр утвориться власною електричною ємністю магнітостриктора C_0 і індуктивністю дроселя L_0 . Електричне з'єднання власної ємності магнітостриктора C_0 та активного опору втрат R_H разом з індуктивністю L_0 дроселя забезпечує електричний резонанс на частоті, близькій або відповідній механічній частоті, використовуваної ультразвуківої коливальної системи.

На основі вище викладеної методики були проведені розрахунки частоти робочого органа коливальної системи, що живиться генератором електричних коливань із частотою 22 кГц. Зовнішній діаметр робочого органу 10 мм, за умови забезпечення інтенсивності ультразвукового поля на випромінюючій поверхні робочого органа, рівної 78 Вт/см². Товщина стінки робочого інструмента циліндричної форми для забезпечення заданої інтенсивності варіювалася від 0,5 до 1 мм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Technology and functional property of dietary supplements made of secondary meat raw materials / A. Cherevko, N. Pogozhykh, V. Kovalenko, V. Yevlash // *Journal of EcoAgriTourism*. – 2010. – Vol. 6, № 1 (18). – P. 114–117.
2. Винникова Л. Г. Технология мяса и мясных продуктов / Л. Г. Винникова. – К. : Инкос, 2006. – 600 с.
3. Сирохман І. В. Товарознавство м'яса і м'ясних товарів / І. В. Сирохман, Т.М. Лозова. – 2-ге вид. перероб. та доп. – К. : Центр учбової літератури, 2009. – 378 с.
4. Maller A. J. Analysis of Warner Bratsler shear pattern with regard to myofibrillar and connective tissue components of tenderness / A. J. Maller. // *Meat. Sci.* – 1981. – Vol. 5, №4. – P. 247–260.
5. Дейниченко Г. В. Вдосконалення процесів переробки м'ясної сировини в підприємствах харчування : монографія / Г. В. Дейниченко, О. О. Простаков, В. В. Дуб. – Х. : ХДУХТ, 2003. – 349 с.
6. Смоляр В. И. Рациональное питание / В. И. Смоляр. – К. : Наук. думка, 2001. – 368 с.
7. Справочник технолога колбасного производства / [Рогов И. А. и др.]. – М. : Колос, 2003. – 432 с.
8. Husband P. M. Beef tenderness the influence of animal age and postmortem treatment / P. M. Husband, B. V. Jahnsen // *CSJRO Food Res. Quart.* – 2004. Vol. 45, №1. – P. 1–4.
9. Справочник по разделке мяса, производству полуфабрикатов и быстрозамороженных готовых мясных блюд / [Б. Е. Гутник, Н. Ф. Генералов, Н. К. Шигаева и др.]. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1984. – 344 с.

10. Справочник. Физико-химические и биохимические основы технологии мяса и мясопродуктов / [под общ. ред. А. А. Соколова]. – М. : Пищевая пром.-сть, 1973. – 496 с.
11. Химический состав пищевых продуктов. Справочные таблицы содержания основных пищевых веществ и энергетической ценности блюд и кулинарных изделий. – М. : Легкая и пищевая пром.-сть, 2004. – 328 с.
12. Asghar Z. The mechanism for promotion of tenderness in meat during the post-mortem: review CRC critical Reviews / Z. Asghar, N. Tcates. // Food Science and Nutrition. – 1978. – Vol. 31, №6. – P. 115–145.
13. Химический состав крупнокусковых полуфабрикатов из говядины / [Л. Ф. Камышева, В. Г. Колесникова, Л. И. Соловьева и др.] // Достижения в области исследования сырья и продукции мясного производства : сб. науч. тр. / ВНИИМП. – М., 1981.
14. Соловьев В. И. Созревание мяса, теория и практика процесса / В. И. Соловьев. – М. : Пищевая пром.-сть, 1966. – 338 с.
15. Козак В. Л. Влияние основных факторов на качество говядины / В. Л. Козак // Молочная и мясная промышленность, 1989. – № 5. – С. 21–23.
16. Ramsbottom Y. M. Comparative tenderness and identification of muscles in wholesale beef cuts / Y. M. Ramsbottom, E. Y. Strandine // Food Research. – 1948. – Vol. 13, № 4. – P. 315–330.
17. Беляев М. И. Индустриальные технологии производства продукции общественного питания / М. И. Беляев. – М. : Экономика, 1989. – 270 с.
18. Соколов А. А. О качестве мясных продуктов / А. А. Соколов // Мясная индустрия СССР. – 1976. – № 2. – С. 22–28.
19. Технология производства продукции общественного питания / [В. С. Баранов, А. И. Мглинец, Л. М. Алешина и др.]. – М. : Экономика,

1986. – 400 с.

20. Беляев М. И. Производство полуфабрикатов для предприятий общественного питания / М. И. Беляев, Г. А. Винокуров, А. И. Черевко. – М. : Экономика, 1985. – 186 с.

21. Баранов В. С. Основы технологии продукции общественного питания / В. С. Баранов. – М. : Экономика, 1987. – 206 с.

22. Пивоваров В. И. Организация производства полуфабрикатов в общественном питании / В. И. Пивоваров, В. М. Платонов. – М. : Высшая школа, 1990. – 190 с.

23. Саенко И. П. Изменение водосвязывающей способности говядины в процессе хранения и технологической обработки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / И. П. Саенко. – Одесса, 1973. – 32 с.

24. Азарх З. Ш. О разделке говядины в розничной торговле и производство фасованного мяса / З. Ш. Азарх // Молочная и мясная промышленность. – 1989. – №1. – С. 27–31.

25. Заяс Ю. Ф. Качество мяса и м'ясопродуктів / Ю. Ф. Заяс. – М. : Легкая и пищевая пром.-сть, 1981. – 480 с.

26. Тимощук И. И. Совершенствование технологии мясных продуктов / И. И. Тимощук. – К. : Урожай, 1988. – 192 с.

27. Лобзов К. И. Переработка мяса, птицы и яиц / К. И. Лобзов, В. И. Митрофанов, В. И. Хлебников. – М. : Агропромиздат, 1987. – 240 с.

28. Мицык В. Е. Увеличение сырьевых ресурсов для производства мясных продуктов / В. Е. Мицык, А. Ф. Невольниченко. – К. : Урожай, 1990. – 148 с.

29. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.bulanoff.ru/sport_library/pshenin/2_belki_i_belkovye_produkty.htm.

30. Павловский П. Е. Биохимия мяса / П. Е. Павловский, В. В. Пальмин. – М. : Пищевая пром-сть, 1975. – 344 с.
31. Лимонов Г. Б. Вибрационная техника и технология мясной промышленности / Г. Б. Лимонов, О.П. Боровикова, Л.В. Смирнова. – М. : Агропромиздат, 1989.
32. Зависимость биологической ценности мяса от содержания в нем соединительной ткани / [А. И. Горшков, А. А. Тексеев, Ю. И. Ковалев и др.] // Вопросы питания. – 1990. – № 6. – С. 52–56.
33. Жаринов А. И. Основы современных технологий переработки мяса. Краткий курс. Ч. 2. Цельномышечные и реструктурированные мясопродукты / А. И. Жаринов. – М.: РТ 1, 1997.
34. Антипова Л. В. Методы исследования мяса и мясных продуктов / Л. В. Антипова, И. А. Глотова, И. А. Рогов. – М. : Колос, 2001.
35. Разуваев А. Н. Основы современных технологий переработки мяса. Краткие курсы фирмы «Протеин Технолоджиз Интернэшнл» / А. Н. Разуваев, А. Б. Ключников.
36. Pfeiffer H. Possibilities of early recognition of deficiencies in the quality of meat particularly considering biochemical parameters and halothane reactivity test / H. Pfeiffer // Muscle Function and Porcine Meat Quality. – 1979. – P. 349—356.
37. Ивашов В. И. Новое в науке о мясе : обзор. информация / В. И. Ивашов, Ю. П. Ермаков, С. К. Апрашкина. – М. : АгроНИИТЭИММП, 1988. – 40 с.
38. Лори Р. А. Наука о мясе : [пер. с англ.] / Р. А. Лори. – М. : Пищевая пром-сть, 1973.
39. Технология мяса и мясопродуктов / [Л. Т. Алехина, А. С. Большаков, В. Г. Боресков и др.] ; под ред. И. А. Рогова. – М. : Агропромиздат, 1988. – 576 с.

40. Коваленко В.О. Перспективи розвитку технологій м'ясних січених напівфабрикатів з використанням композицій протеолітичних ферментних препаратів / В.О. Коваленко, В.Г. Горбань, Л.О. Чернова // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. / Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х., 2009. – Вип. 1 (9).

41. Скаменский Е. И. Микроструктура мяса / Е. И. Скаменский, А. А. Белоусов. – М. : Пищевая пром-сть, 1988. – 175 с.

42. Большаков О. В. Тенденции развития оборудования для мясной промышленности / О. В. Большаков. – М. : АгроНИИТЭИММП, 1991. – 36 с.

43. Кармас Э. Технология свежего мяса / Э. Кармас. – М. : Пищевая пром-сть, 1979. – 336 с.

44. Тендеризация мяса под высоким давлением воды // Мясная индустрия СССР. – 1982. – №11. – С. 26.

45. Пат. 667182 Швейцария, МКИ А 23 В 2/02; А 22 С 17/00. Устройство для шприцевания отрубов. опубл. 30.09.88.

46. А.с. 1316625 СССР, МКИ А 23 В 4/02 Способ посола мяса для производства формованных мясных изделий: / Л. С. Кудряшов, Н. Н. Потипаева. – заявл. 29.11.84 ; опубл. 15.06.87, Бюл. № 22.

47. Салаватулина Р. М. Рациональное использование сырья в колбасном производстве / Р. М. Салаватулина. – М. : Агропромиздат, 1985. – 256 с.

48. Рогов И. А. Общая технология мяса и мясопродуктов / И. А. Рогов, А. Г. Забашта, Г. Г. Козюлин. – М. : Колос, 2000. – 367 с.

49. Пат. 49752, МПК А23J 1/06, С12N 9/64. Спосіб ферментативної обробки колагенвмісної сировини (сухожиль та жилок) колагеназою / Черевко О. І., Коваленко В. О., Чуйко Л. О., Чернова Л. О., Горбань В. Г.,

Москаленко О. В., Коваленко С. М. – № u200911690 ; заявл. 16.11.09 ; опубл. 11.05.10, Бюл. № 9. – 4 с.

50. Пат. 49750, МПК А23J 1/06, С12N 9/64. Спосіб ферментативної обробки колагенвмісної сировини (курячих ніг) бромеліном / Черевко О. І., Коваленко В. О., Янчева М. О., Чернова Л. О., Горбань В. Г., Москаленко О. В., Дуденко Н. В. – № u200911687 ; заявл. 16.11.09; опубл. 11.05.10, Бюл. № 9. – 4 с.

51. Черевко А. И. Влияние ферментативной обработки на микроструктуру коллагеносодержащего мясного сырья / А. И. Черевко, В. А. Коваленко, О. В. Москаленко // Мясная индустрия. – 2008. – № 2. – С. 3–5.

52. Коваленко В. О. Перспективи розвитку технологій м'ясних січених напівфабрикатів з використанням композицій протеолітичних ферментів / В. О. Коваленко, В. Г. Горбань, Л. О. Чернова // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Х., 2008. – Вип. 2 – С. 27–28.

53. Пат. 3442660 США / патентовладелец фирма «Swift & Company». – опубл. 6.05.69.

54. Neuman R. E. Determination of collagen and elastin in tissue / R. E. Neuman, M. A. Logan // Biol. Chem. – 1980. – Vol. 186. – P. 549–556.

55. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.meat.ru/global/view.asp?id=351>.

56. Эльпинер И. Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И. Е. Эльпинер. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.

57. Заяс Ю. Ф. Интенсификация технологических процессов при помощи ультразвука / Ю. Ф. Заяс. // Пищевая промышленность. – М. : ЦИНТИпищепром, 1960. – № 3 (16). – С. 21–28.

58. Донской. А. В. Ультразвуковые электротехнические установки / А. В. Донской, О. К. Келлер, Г. С. Кратыш. – Л. : Энергия, 1968. – 276 с.
59. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах : ГОСТ 12.1.002-84. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 10 с.
60. Рогов И. А. Физические методы обработки пищевых продуктов / И. А. Рогов, А. В. Горбатов. – М. : Пищевая пром-сть, 1974.
61. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.meat.ru/global/view.asp?id=227>.
62. Suss W. Das Erweichen des Fleisches des Rindfleisches mit Hilfe des Ultralautes / W. Suss. – Die Pharmazie. – 1972. – Bd. 27. – S. 615–616.
63. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://agnuprofix.narod.ru/book/myaso.htm>.
64. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.kolbasaclub.ru/forum/viewtopic.php?pid=587#p587>.
65. Заяс Ю. Ф. Применение ультразвука в мясной промышленности / Ю. Ф. Заяс, Т. Н. Орлова // Доклады научно-технического совещания по применению ультразвука в пищевой промышленности. Воронеж, 1964. – М., 1965. – С. 33.
66. Воробьев Е. А. Теория ультразвуковых колебаний как основа построения и применения технических средств получения информации : учеб. пособие / Е. А. Воробьев. – СПб. : СПбГУАП, 2002. – 54 с.
67. Розенберг И. Я. Мощные ультразвуковые поля / И. Я. Розенберг // Физика и техника мощного ультразвука, кн. 2. – М. : Наука, 1968.
68. Хмелев В. Н., Попова О. В. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве / В. Н. Хмелев,

О. В. Попова. – Барнаул : АлтГТУ, 1997. – 160 с.

69. Маргулис М. А. Звукохимические реакции и сонолюминесценция / М. А. Маргулис. – М. : Химия, 1986.

70. Макаров Л. О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии / Л. О. Макаров. – М. : Машиностроение, 1983.

71. Кроуфорд А. Э. Ультразвуковая техника / А. Э. Кроуфорд ; под ред. А. С. Матвеева. – М. : Изд-во иностранной литературы, 1958.

72. Заяс Ю. Ф. Ультразвук и его применение в технологических процессах мясной промышленности / Ю. Ф. Заяс. – М. : Пищевая промышленность, 1970.

73. Розенберг И. Я. Физические основы ультразвуковой технологии / И. Я. Розенберг // Физика и техника мощного ультразвука, кн. 3. – М. : Наука, 1968.

74. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – 9-е изд. – М. : Химия, 1973. – 750 с.

75. Кардашов Г. А. Тепломассообменные акустические процессы и аппараты / Г. А. Кардашов, П. Е. Михайлов. – М. : Машиностроение, 1976.

76. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : в 2 ч. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 2002. – 400 с.

77. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии : в 2 ч. Ч. 2. Массообменные процессы и аппараты / Ю. И. Дытнерский. – М. : Химия, 2002. – 368 с.

78. Брук М. М. Получение лекарственных препаратов из животного и растительного сырья под действием ультразвука / М. М. Брук // Ультразвук в физиологии и медицине : сб. статей. – Ростов н/Д., 1972. – Т. 1. – С. 115–116.

79. Гершгал Д. А., Фридман В. М. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д. А. Гершгал, В. М. Фридман. – М. : Энергия, 1974.

80. Молчанов Г. И. Ультразвук в фармации / Г. И. Молчанов. – М. : Медицина, 1980.

81. Использование ультразвуковых колебаний для интенсификации процессов экстракции лекарственного животного сырья / [Литвинова Т. П. и др.] // Современные аспекты исследований в области фармации : сб. статей. – Рига, 1977. – С. 96–97.

82. Багдасаров Х. С. Применение ультразвука для диспергирования / Х. С. Багдасаров // Кристаллография. – 1958. – Т. 3. – С. 110–111.

83. Кортнев А. В. Термодинамические и статистические методы исследования ультразвуковой кавитации : дис. доктора техн. наук : ГПС-528 / Кортнев А. В. – Одесса, 1969. – 314 с.

84. Пат. 2980537 США Softening of meat of beef by means of ultrasound / Hagen W. F. ; патентовладелец фирма «The Union Stock Yard and Transit Company of Chicago». – Оpubл. 18.04.61.

85. Macintosh I. Y. C. Ultrasound and «in vitro» beef tenderness / I. Y. C. Macintosh, R. C. Brown, W. Y. Coakley. // Brit. J. Radiol.. – 1975. – Vol. 48, № 430. – P. 230–232.

86. Обработка жидких пищевых продуктов в полях упругих волн высокой интенсивности / Ю. А. Дашковский, А. И. Украинец, И. В. Мыколив, Н. Л. Беленчук // Разработка и внедрение высокоэффективного ресурсосберегающего оборудования и новых видов пищевых продуктов в пищевой и перерабатывающей отраслях АПК : Республ. науч.-техн. конф., 22-24 сентября 1991 г. : тезисы докл. – К. : Изд-во Технол. ин-та. пищ. пром-сти, 1991. – С. 150–151.

87. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.u-sonic.ru>.
88. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.u-sonic.ru/downloads/lecture2.pdf>.
89. Квашнин С. Е. Медицинские электроакустические системы : учебн. пособ. / С. Е. Квашнин. – М. : Изд-во МГТУ, 2002.
90. Хмелев В. Н. Размерная обработка хрупких и твердых материалов / В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок. – Барнаул : АлтГТУ, 1999.
91. Розенберг И. Я. Источники мощного ультразвука / И. Я. Розенберг // Физика и техника мощного ультразвука, кн. 1. – М. : Наука, 1968.
92. Ультразвуковая технология / Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский, Н. Н. Хавский. – М. : Металлургия, 1974. – С. 226-228.
93. Стандарт Международной электротехнической комиссии МЭК, публикация 782. – М. : 1987. – Разд. 12, п. 12.1.
94. Эльпинер И. Е. Биофизика ультразвука / И. Е. Эльпинер. – М. : Наука, 1975. – С. 240.
95. Ультразвук для врача / А. Дрейд. – М. : Медицинский градусник, 2000. – С. 21.
96. Визначення інтенсивності випромінювання акустичної потужності ультразвукової установки / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний, Д. А. Нечипоренко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х., 2009. – Вип. 1 (9). – С. 238-243.
97. Чеканов М. А. Використання ультразвуку в харчових технологіях / М. А. Чеканов, В. М. Червоний, Д. А. Нечипоренко //

Технологія 2005 : VIII Всеукр. наук.-практ. конф. студ., асп. та молодих вчених : тези доп. – Северо-донецьк, 2005. – С. 70–71.

98. Электрофизические, оптические и акустические характеристики для пищевых продуктов / [И. А. Рогов, В. Я. Адаменко, С. В. Некрутман и др.] ; под ред. И. А. Рогова. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1981. – 288 с.

99. Постнов Г. М. Автоматизація вимірювання акустичної потужності ультразвукової установки за допомогою калориметричного методу / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов // Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : 73-тя наук. конф. молодих вчених, асп. і студ. : матеріали / НУХТ. – К., 2007. – Ч. 2. – С. 17.

100. Постнов Г. М. Вивчення проникнення ультразвукових коливань у м'ясо великої рогатої худоби з високим вмістом з'єднувальної тканини / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. праць / ДонДУЕТ. – Донецьк, 2006. – Вип. 14. – С. 87–91.

101. Постнов Г. М. Знезараження м'ясної сировини за допомогою ультразвуку / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, Д. А. Нечипоренко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Х., 2007. – Вип. 1 (5). – С. 298–301.

102. Постнов Г. М. Визначення енергії ультразвукових коливань, що розсіялась під час ультразвукової обробки м'ясної сировини / Г. М. Постнов, А. О. Пак, М. А. Чеканов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х., 2009. – Вип. 1 (9). – С. 518-523.

103. Постнов Г. М. Дослідження впливу ультразвуку частотою 22 кГц на м'ясо крупної рогатої худоби з великим вмістом з'єднувальної тканини / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х., 2004. – С. 361-367.

104. Постнов Г. М. Експериментальна методика визначення фізичних властивостей тендеризованого м'яса в лабораторних умовах / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов // Вісник Харківського національного університету сільського господарства імені Петра Василенка [«Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв»]. – Х., 2006. – Вип. 45. – С. 211–215.

105. Постнов Г. М. Використання ультразвукових коливань для розм'якшення м'яса великої рогатої худоби з високим вмістом з'єднувальної тканини / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. праць / ДонДУЕТ. – Донецьк, 2005. – Вип. 12, Т. 2. – С. 43–51.

106. Пат. 48064 У Україна, МПК G01B 9/00. Пристрій для вимірювання сили різання / Постнов Г. М., Чеканов М. А., Червоний В. М. ; заявник та патентовласник ХДУХТ. – № u200907855; заявл. 27.07.09 ; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5. – 4 с.

107. Постнов Г. М. Вимірювання акустичної потужності ультразвукової установки за допомогою калориметричного методу / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, О. Г. Дьяков // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Х., 2007. – Вип. 1 (5). – С. 535–540.

108. Вплив ультразвукової обробки на продукти харчування / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний, Д. А. Нечипоренко //

Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Х., 2006. – Вип. 2 (4). – С. 220–224.

109. Пат. 16116 U Україна, МПК G 01 B 9/00. Пристрій для вимірювання лінійних переміщень / Постнов Г. М., Чеканов М. А., Дуб В. В., Червоний В. М. ; заявник та патентовласник ХДУХТ. – № u200602096; заявл. 27.02.06 ; опубл. 17.07.06, Бюл. №7.

110. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / [А. В. Горбатов, А. М. Маслов, Ю. А. Мачихин и др.] ; под ред. А. В. Горбатова. – М. : Легкая и пищевая пром.-сть, 1982. – 296 с.

111. Effects of electrical stimulation and delayed chilling of beef carcasses on carcass and meat rheological characteristics / [E. A. Elgasim, W. H. Kennick, L. A. McGill [et al.] // J. Food Sci. – 1981. – № 46. – 340 p.

112. Реометрия пищевого сырья и продуктов : справочник / [А. В. Горбатов, Ю. А. Мачихин, А. П. Максимов и др.]. – М. : Агропромиздат, 1990.

113. Исследование физических свойств мяса / С. Тышкевич ; пер. с пол. Т. С. Клоссовского ; под ред. проф. А. А. Соколова. – М. : Пищевая пром-сть, 1972. – С 7.

114. Малинівський С. М. Загальна електротехніка : навч. посібник / С. М. Малинівський. – Львів : Львівська політехніка, 2001. – С. 452–455.

115. Матц С. А. Структура и консистенция пищевых продуктов / С. А. Матц. – М. : Пищевая пром.-сть, 1972. – С. 237.

116. Горбатов А. В. Реология мясных и молочных продуктов / А. В. Горбатов. – М. : Пищевая пром-сть, 1979. – 384 с.

117. Молоко и молочные продукты. Титриметрические методы определения кислотности : ГОСТ 3624-92. – [Взамен ГОСТ 3624-67] ; введ. 01.01.94. – 18 с.

118. Погожих Н. И. Научные основы теории и техники пищевого сырья в массообменных модулях : дис. доктора техн. наук / Погожих Н. И. – Х., 2002. – 355 с.

119. Сомов А. С. Експериментальна методика визначення вільної та зв'язаної вологи методом диференційної термопарі / А. С. Сомов, В. О. Потапов, Т. Г. Мудровський // Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка : Міжнар. наук.-практ. конф. : тези доп. – Святогорськ, 2003. – С. 119.

120. Физические величины : справочник / [А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.] : под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

121. Кузнецов О. А. Реология пищевых масс : учеб. пособие / О. А. Кузнецов, Е. В. Волошин, Р. Ф. Сагитов. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2005. – 106 с.

122. Пак А. О. Определение количества свободной и связанной влаги в мясе после ультразвуковой обработки / А. О. Пак, Н. А. Чеканов // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : Всеукр. наук.-практ. конф. : 31 жовтня 2008 р. : тези доп. / ХДУХТ. – Х., 2008. – С. 5–6.

123. Постнов Г. М. Особливості ультразвукової дії на харчові продукти / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, О. Ю. Мілаш // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х., 2003. – С. 227–233.

124. Постнов Г. М. Визначення структурно механічних властивостей м'яса з великим вмістом з'єднувальної тканини під час озвучення його ультразвуком частотою 22кГц / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов // Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне

обґрунтування у підприємствах харчування : зб. наук. праць / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Х., 2005. – С. 303–309.

125. Определение структурно-механических свойств мяса с высоким со-держанием соединительной ткани, обработанного ультразвуком / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний, Д. А. Нечипоренко // Наука і соціальні проблеми суспільства: харчування, екологія, демографія : IV Міжнар. наук.-практ. конф. : матеріали / ХДУХТ. – Х., 2006. – Ч. 1. – С. 385–387.

126. Постнов Г. М. Автоматизація процесу отримання експериментальних даних за допомогою модернізованого пластомеру Толстого для визначення структурно-механічних властивостей м'яса / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Х., 2006. – Вип. 2 (4). – С. 271–275.

127. Яхимович Д. Ф. Инженерный расчет ультразвуковых колебательных систем. : [учеб. пособие для заоч. курсов повышения квалификации ИТР по применению ультразвука в машиностроении] / Д. Ф. Яхимович, Ю. И. Китайго-родский. – М. : Машиностроение, 1982. – 56 с.

128. Чеканов М. А. Спосіб виміру амплітуди коливання випромінювача ультразвукової коливальної системи / М. А. Чеканов, В. М. Червоний // Наукові здобутки молоді вирішенню проблем харчування людства у ХХІ столітті : 72-га наук. конф. молодих вчених, асп. і студ. : матеріали / НУХТ. – К., 2006. – Ч. 2. – С. 27.

129. Волков С. С. Расчет и конструирование ультразвуковых сварочных машин / С. С. Волков, Ю. Н. Орлов, Б. Я. Черняк ; Центральный научно-исследовательский ин-т информации и технико-экономических исследований легкой пром-сти. – М., 1974. – 103 с.

130. Гершгал Д. А. Проектирование ультразвуковой технологической аппаратуры / Д. А. Гершгал. – М. : Энергия, 1985. – 212 с.

131. Макаров Л. О. Методика расчета стержневых экспоненциальных концентраторов / Л. О. Макаров // Применение ультразвука в промышленности. – М. : Машгиз, 1959.

132. Теумин И. И. Ультразвуковые волноводно-излучающие устройства / И. И. Теумин. – М. : Машгиз, 1963.

133. Постнов Г. М. Підвищення ккд ультразвукового апарата для розм'якшення м'ясної сировини / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса, 2006. – Вип. 28. – Т. 2. – С. 136.

134. Автоматизоване проектування ультразвукової коливальної системи за допомогою графічно-розрахункового пакету SOLID WORKS / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний, Д. А. Нечипоренко // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. праць / ХДУХТ. – Х., 2005. – Вип. 2. – С. 256–260.

135. Пат. 48063 U Україна, МПК А22С 9/00. Пристрій для тендеризації м'ясної сировини за допомогою ультразвуку / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний. ; заявник та патентовласник ХДУХТ. – № u200907852; заявл. 27.07.09 ; опубл. 10.03.10, Бюл. № 5. – 4 с.

136. Пат. 71761 U Україна, МПК А22С 9/00. Спосіб тендеризації м'ясної сировини / Г. М. Постнов, М. А. Чеканов, В. М. Червоний. ; заявник та патентовласник ХДУХТ. – № u201200417; заявл. 25.07.12 ; опубл. 25.07.12, Бюл. № 14. – 4 с.

Григорій Вікторович ДЕЙНИЧЕНКО
Геннадій Михайлович ПОСТНОВ,
Микола Анатолійович ЧЕКАНОВ,
Віталій Миколайович ЧЕРВОНИЙ,
Данила Олександрович НЕЧИПОРЕНКО

БЕЗВІДХОДНА ПЕРЕРОБКА М'ЯСА
З ВИСОКИМ ВМІСТОМ СПОЛУЧНОЇ ТКАНИНИ
З ВИКОРИСТАННЯМ УЛЬТРАЗВУК

Монографія

Редактор: Г. Постнов
Коректор: В. Червоний
Комп'ютерна верстка: *М. Чеканов*
Підписано до друку 03.09.2012 р.
Формат 60x84 1/16.
Папір офсетний. Гарнітура Таймс.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 14,2.
Наклад 500 прим. Вид. № 2-10.
Видавництво «Факт»

Україна, 61166, м. Харків, вул. Бакуліна, 11, оф.4-28.
Тел./факс: (057) 756-43-75, 760-47-16. E-mail: publish_fakt@mail.ru
Свідоцтво про держреєстрацію: серія ДК №3172 від 22.04.2008 р.