

**Київський національний торговельно-економічний
університет**

С.Л. Шаповал, Р.П. Романенко, Н.П. Форостяна

**ДІАГНОСТИКА ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ**

Монографія

Київ 2017

Розповсюдження і тиражування без офіційного дозволу КНТЕУ заборонено

УДК 641.1
Ш 24

Автори: С.Л. Шаповал, канд. техн. наук, доц.,
Р.П. Романенко, канд. техн. наук, доц.,
Н.П. Форостяна, канд. пед. наук, доц.

Рецензенти: Н.В. Притульська, д-р техн. наук, проф., Київський національний торговельно-економічний університет;
П.П. Пивоваров, д-р техн. наук, проф., Харківський державний університет харчування та торгівлі;
О.Ю. Шевченко, д-р техн. наук, проф., Національний університет харчових технологій;
Ю.В. Литвинов, головний інженер ТОВ «ІТМ»

*Рекомендовано до друку вченою радою Київського національного торговельно-економічного університету
(протокол № 3 від 26 жовтня 2017 р.)*

Шаповал С.Л.

Ш 24 Діагностика фізичних властивостей харчових продуктів :
монографія / С.Л. Шаповал, Р.П. Романенко, Н.П. Форостяна. –
Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2017. – 192 с.

ISBN 978-966-629-849-5

DOI: 10.31617/m.knute.2017-1740

Розроблено інформаційно-вимірвальний комплекс для дослідження та реєстрації змін фізичних властивостей харчових продуктів з метою контролю їх якості на всіх стадіях технологічного процесу, а також набір методів і технічного забезпечення для дослідження теплофізичних, реологічних і оптичних властивостей харчових продуктів у процесі зберігання та кулінарної обробки.

Запропоноване обладнання і методика обробки результатів досліджень осьової релаксації, penetрації, динаміки температурного градієнта та оптичної проникності дозволяє оцінювати ступінь змін реологічних, теплофізичних та оптичних властивостей, їх кореляцію із органолептичними та мікробіологічними показниками якості харчових продуктів, а також формувати рекомендації щодо режимів кулінарної обробки.

УДК 641.1

ISBN 978-966-629-849-5

© Шаповал С.Л., Романенко Р.П.,
Форостяна Н.П., 2017

© Київський національний торговельно-
економічний університет, 2017

ЗМІСТ

Вступ	5
Розділ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТА РЕЄСТРУЮЧОГО ОБЛАДНАННЯ	8
1.1. Особливості використання цифрових вимірювальних приладів у дослідженнях фізичних властивостей харчових продуктів	8
1.2. Вибір реєструючого вимірювального блоку	14
1.3. Технічні характеристики та можливості приладу МІГ-1.3	21
1.4. Розроблення датчиків та програмного забезпечення	28
Розділ 2. БУДОВА, КОМПЛЕКТАЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДУЛЯ «РЕОЛОГІЯ» ПРИЛАДУ МІГ-1.3	37
2.1. Теоретико-методологічні основи дослідження структурно-механічних властивостей сировини та матеріалів	37
2.2. Релаксаційне зусилля при осьовій деформації стиску	44
2.3. Релаксація при осьовій деформації розтягу	49
2.4. Дослідження термопружності.....	53
2.5. Визначення граничної напруги зсуву за сталої швидкості зсуву	55
2.6. Визначення абсолютної та кінематичної в'язкості	66
Розділ 3. БУДОВА, КОМПЛЕКТАЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДУЛЯ «ПОВЕРХНЯ» ПРИЛАДУ МІГ-1.3	75
3.1. Визначення адгезії	75
3.2. Визначення кінетичного коефіцієнта тертя.....	78
3.3. Визначення міцності поверхні однорідних структур.....	84
3.4. Визначення міцності поверхні неоднорідних структур.....	92

Розділ 4. БУДОВА, КОМПЛЕКТАЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДУЛЯ «ОПТИКА» ПРИЛАДУ МІГ-1.3.....	98
4.1. Визначення каламутності продуктів	98
4.2. Визначення швидкості седиментації дисперсних систем.....	112
4.3. Визначення прозорості желейної продукції	119
Розділ 5. БУДОВА, КОМПЛЕКТАЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДУЛЯ «ТЕПЛОТА» ПРИЛАДУ МІГ-1.3	125
5.1. Теоретико-методологічні основи дослідження теплофізичних характеристик сировини та матеріалів	125
5.2. Фазові переходи та їхній вплив на теплофізичні характеристики харчових продуктів.....	131
5.3. Використання математичного моделювання у теплофізичних дослідженнях	134
5.4. Дослідження динаміки теплофізичних властивостей у процесі термічної обробки	140
5.5. Дослідження взаємозв'язку теплофізичних та реологічних властивостей	145
5.6. Визначення залежності межі міцності продукту від температури	149
Розділ 6. ВИКОРИСТАННЯ ФОТО- ТА ВІДЕОРЕЄСТРАТОРІВ ПІД ЧАС ВИМІРЮВАНЬ НА ПРИЛАДІ МІГ-1.3.....	153
6.1. Відеофіксація процесів та експериментів.....	153
6.2. Визначення розмірів частинок дисперсних матеріалів цифровими вимірювальними приладами.....	162
ВИСНОВКИ	176
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	178

ВСТУП

Вирішення продовольчих проблем в умовах сьогодення набуло глобального екологічного та соціально-економічного характеру. Для більшості країн світу, як і для України, актуальними є проблеми значної втрати об'ємів харчової сировини та низького рівня збереження її харчової цінності та якості. Сучасна індустрія виробництва сільськогосподарської сировини та харчових продуктів досить різнопланова. Однак на харчових підприємствах середнього і малого бізнесу у багатьох випадках ще використовується застаріле обладнання. У зв'язку з цим режими кулінарної обробки іноді далекі від раціональних, що призводить до перевитрати електроенергії і низької якості готової продукції. Водночас на тлі бурхливого розвитку харчової промисловості з'являється значна кількість нових харчових продуктів з індивідуальними фізичними характеристиками, значення яких необхідно закладати при розрахунку параметрів технологічного процесу, особливо для режимів термічної обробки.

Актуальним і соціально значущим у харчовій промисловості є вирішення питання енергоефективності та ресурсозбереження виробництва. Це важливо не лише для збереження сировини, а й для визначення оптимальних параметрів теплообміну, вдосконалення характерних апаратів, за допомогою у яких здійснюється теплова обробка, економії часу для обробки тощо.

У процесі виробництва, пакування, зберігання харчових продуктів, як відомо, відбуваються зміни структурно-механічних властивостей. Знаючи характер цих змін, можна

контролювати хід технологічного процесу, реалізуючи його в оптимальному режимі. У реальних процесах механізм передачі теплоти залежить від структури досліджуваного матеріалу, а теплообмін часто неможливо відділити від масообміну і вологопровідності. Важливим етапом розробки технології нових продуктів харчування є визначення їх теплофізичних властивостей та режимів термічної обробки.

Використання стандартизованих фізико-хімічних методів дослідження сировини та харчових продуктів є дорогим і проблематичним у реалізації в масштабах окремого закладу торгівлі, ресторанного господарства чи міні-виробництва. Фізичні ж методи дослідження не потребують складної підготовки зразків і значно простіші у використанні. Тому доцільним є поєднання теплофізичних, електрофізичних та реологічних методів дослідження фізичних властивостей в одному приладі. Це було реалізовано через розробку та технічну реалізацію вимірювального модульного комплексу МІГ-3.

У монографії описано процес використання цього лабораторного обладнання для дослідження фізичних характеристик харчових продуктів, встановлення залежності структурно-механічних властивостей від температури обробки, взаємозв'язку окремих показників якості сировини та її електрофізичних особливостей, термодинамічних процесів під час деформації.

Авторами розкрито особливості використання цифрових вимірювальних приладів під час дослідження фізичних властивостей харчових продуктів. Наведено технічні характеристики та дослідницькі можливості розробленого багатofункціонального вимірювального комплексу МІГ-1.3. Описано будову

і принцип роботи модулів «Реологія», «Поверхня», «Оптика», «Теплота», «Фотомодуль». Особливу увагу приділено розкриттю теоретико-методологічних основ досліджень структурно-механічних властивостей сировини та матеріалів; виникненню сил молекулярної взаємодії твердої поверхні з фракційними структурами харчових продуктів; визначенню адгезійних та когезійних властивостей сировини та матеріалів на молекулярному рівні; вивченню характеру проникнення теплового поля в досліджуваний об'єкт з подальшим визначенням теплоємності, коефіцієнта теплопровідності та теплопередачі. Запропоновано використання модулів «Оптика» та «Фотомодуль» для визначення швидкості седиментації дисперсних систем, оптичної прозорості рідких харчових продуктів, визначення розмірів частинок дисперсних матеріалів.

Розкрито перспективи використання даного вимірювального комплексу для дослідження фізичних об'єктів: сировини рослинного та тваринного походження, різноманітних харчових продуктів на їх основі тощо.

Монографія буде корисною фахівцям, які займаються проблемами діагностики та експертизи харчових продуктів, дослідженнями в галузі товарознавства та харчових технологій.

Автори висловлюють щирю вдячність за наукові поради, вагому методичну та творчу допомогу доктору економічних наук, професору Мазаракі А.А., а рецензентам – за слушні зауваження і критичне оцінювання результатів дослідження.

Розділ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО ТА РЕЄСТРУЮЧОГО ОБЛАДНАННЯ

1.1. Особливості використання цифрових вимірювальних приладів для дослідження фізичних властивостей харчових продуктів

Консистенцію продуктів тваринного походження визначають органолептично. Після натискання на зразок візуально визначається час відновлення попередньої форми [1].

Проте такий спосіб має недоліки: від суб'єктивного сприйняття людиною часу та необхідного досвіду до невідомої структури зразка під поверхнею, на яку натискають.

Серед експрес-методів визначення якості харчової сировини, як правило, простішими є фізичні методи [2], застосування яких пов'язано із відсутністю потреби в хімічних реактивах та порівняно вищою швидкістю визначення параметрів сировини.

Для визначення фізичних параметрів сировини та матеріалів використовують промислові прилади (рис. 1.1). При з'єднанні із самописним пристроєм реєструється точне значення фізичного параметра впродовж усього експерименту. Мікропроцесорний блок автоматично обраховує значення величини, яку потрібно знайти [3].



*Рис. 1.1. Промисловий прилад
для визначення коефіцієнта тертя
Coesfeld Friction Tester*

Для дослідження структурно-механічних властивостей харчової сировини та напівфабрикатів здебільшого використовують пенетрометри. Це швидкий спосіб визначення консистенції сировини, яку з певної причини не можна дегустувати. Проте, крім визначення межі міцності, penetрація не надає змоги визначити інші структурно-механічні властивості м'ясної сировини, такі як релаксація. Також за допомогою penetрації складно встановити факт зміни структурно-механічних властивостей хімічними речовинами [4].

В Україні над вирішенням проблеми інструментального визначення структурно-механічних властивостей рибної сировини працює команда науковців Національного університету харчових технологій (НУХТ) та Київського національного торговельно-економічного університету (КНТЕУ).

Зокрема, запропоновано спосіб дослідження консистенції методом penetрації [5], який дозволяє швидко визначати ступінь готовності рибних пресервів, проте немає можливості дослідити інші структурно-механічні властивості.

Науковцями запропоновано використання цифрового вимірювального обладнання для дослідження релаксаційних властивостей продукції з рибної сировини [6], що дозволяє інструментально визначати швидкість релаксації рибних пресервів та рекомендувати відповідний тип упаковки. Цей метод досить простий у застосуванні, за допомогою якого паралельно досліджують супутні penetрації процеси, але лише за умови використання реєстраційного обладнання.

Для оцінювання консистенції продуктів з незруйнованою структурою доцільно застосовувати прилади, принцип роботи яких базуються на використанні голчастого або конічного інденторів. Запропонована авторами [7] конструкція пенетрометра досить проста, дешева і дозволяє швидко визначати структурно-механічні властивості продуктів. Проте не враховано суттєву різницю механічних властивостей поверхні продукту (шкірочки) і основної маси.

Крім того, показник penetрації (межі міцності поверхні) не дає повного уявлення про реологічні властивості продуктів [8].

Проведено дослідження напружено-деформованого стану біополімерів м'яса, які піддаються процесам пружної, залишкової та високоеластичної деформації [9] при моделюванні процесів різання і подрібнювання за широкого діапазону температур. Проте в публікації немає даних про обладнання, що використовувалося в дослідженнях, його мобільність та можливість використання на виробництві і в торгівлі.

Проблемам встановлення динаміки структурно-механічних властивостей м'яса присвячено багато наукових праць. Зокрема, досліджено зміни реологічних властивостей біфштексів у процесі термічної обробки різними способами [10]. Проте дослідження структури м'яса проводилося лише методом пенетрації, чого недостатньо для комплексного оцінювання реологічних властивостей.

Так, за допомогою методу пенетрації досліджено зміни структури м'яса птиці при різних температурах та вплив на неї коагуляції білків [11]. Органолептичний метод дослідження структурно-механічних властивостей у цьому випадку застосовувати не можна через низькі початкові температури експерименту – від 30 °С. Проте різниця у фізичних властивостях м'яса птиці спостерігалася при високих температурах та значній денатурації білків. Це пояснюється або невисокою чутливістю пенетрометра, або недостатністю даних, отриманих у процесі пенетрації, або сукупністю двох згаданих вище факторів.

У деяких наукових працях здійснено огляд біофізичних методів, що дозволяють визначити сферу використання сировини [12], а також теоретично обґрунтовано комплекс для дослідження якості м'яса протягом виробничого процесу, який містить оптичні, електромагнітні, ультразвукові та механічні датчики. Проте пропоноване обладнання зазвичай використовується у спеціалізованих лабораторіях і його складно застосовувати для експрес-діагностики механічних властивостей м'яса.

У зв'язку з невизначеністю ступеня готовності досліджуваних зразків за новими технологіями проводити дегустацію

небезпечно. Тому структурно-механічні властивості продуктів у процесі дослідження кулінарної обробки способом «sous vide» визначали методом пенетрації [13]. Проте у дослідженні відсутні дані про релаксаційне зусилля, теплопровідність і швидкість розповсюдження тепла зразків, що важливо при формуванні параметрів кулінарної обробки.

Консистенцію кулінарних виробів формують реологічні властивості сировини. Органолептично визначити ці властивості із задовільною похибкою неможливо. Крім того, механічні властивості продуктів можуть значно відрізнятися у кожній партії [10]. У техніці пружні властивості реальних тіл прийнято визначати за отриманим експериментально графіком деформації, що відображає фізичну залежність між відносною деформацією та механічним навантаженням. Тому розробка універсальної методики та обладнання для дослідження реологічних властивостей, аналізу динаміки їх змін та експрес-оцінки консистенції харчових продуктів тваринного походження в умовах міні-виробництва є актуальним завданням.

Агрегатний стан багатьох компонентів харчових продуктів у процесі термічної обробки змінюється. Пов'язані з цим фазові переходи окремих інгредієнтів мають настільки великий вплив на теплофізичні властивості харчових продуктів, що для створення точних математичних моделей змін теплофізичних властивостей м'ясної сировини необхідні потужності обчислювальних комп'ютерних мереж [14].

Реологічні та теплофізичні властивості сировини впливають на формування окремих показників якості харчових продуктів тваринного походження, проте спрогнозувати їх зміни у процесі кулінарної обробки досить складно. Механічні та теплофізичні властивості харчової сировини залежать від багатьох параметрів та суттєво відрізняються від партії до партії [15].

Після появи на ринку України недорогих цифрових реєструючих вимірювальних приладів з'явилася можливість адаптувати методи дослідження матеріалів для визначення та прогнозування якості харчових продуктів.

Дослідженню теплофізичних властивостей харчових продуктів присвячені роботи класиків теплотехніки: А.С. Гінзбурга, Г.Б. Чижова, М.А. Громова, І.А. Чубика, М.А. Маслова, G. Tchigeov, L. Riedel, С.Р. Lentz, але лише розвиток методів програмного моделювання наприкінці минулого століття дозволив не тільки визначати теплофізичні властивості продуктів, а також створювати математичні моделі, що описують їх зміни.

Вплив теплофізичних та структурно-механічних властивостей ягід на їх товарознавчі характеристики і функціонально-технологічні властивості досліджено колективом вчених з м. Харкова [7]. Розроблено комплексну електрофізичну методичку дослідження якості продуктів переробки ягід та доведено ефективність її застосування.

Колективом харківських вчених [16] визначено залежності коефіцієнта теплопровідності тіста від його вологості та способу термічної обробки. Випікання зразків однакової вологості, але різними способами дозволяє отримати готові вироби різної якості. Саме цьому необхідно підбирати індивідуальний режим термічної обробки для кожного нового кулінарного виробу.

У процесі термічної обробки внаслідок денатурації білків та протікання інших біохімічних процесів суттєво змінюються структурно-механічні та теплофізичні властивості харчової сировини та напівфабрикатів. Інтенсивність цих змін залежить від хімічного складу, часу, температури зберігання та інших параметрів. У більшості випадків температурна залежність фізичних параметрів різниться не тільки у різних партіях сировини, а й у окремих зразках [17].

Водночас параметри режимів теплової кулінарної обробки є важливим фактором, що впливає на втрати маси і кінцеву якість готового продукту за рахунок випаровування води [18].

Відома динаміка змін фізико-хімічних властивостей сировини та напівфабрикатів дозволяє суттєво оптимізувати

режими їх термічної обробки, отримати продукцію з максимальним збереженням цінних біологічних речовин і мінімальними втратами вологи, більш раціонально використовувати енергоресурси та виробниче обладнання [19].

Актуальним на сьогодні є пошук нових технологічних прийомів встановлення зв'язку між теплопередачею та електропровідністю продукту і зміною стану його структури на молекулярному рівні, що дозволить створити цифровий вимірювальний комплекс для встановлення математичних залежностей між цими показниками та систему нових експрес-методів моделювання оптимальних параметрів технологічного процесу [20].

Тому розробка універсальної методики й обладнання для дослідження та прогнозування реологічних, теплофізичних та електрофізичних властивостей харчової сировини в умовах міні-виробництва є нагальним завданням.

Харчові підприємства середнього і малого бізнесу в більшості держав, зокрема і в Україні, зазнають значних втрат обсягів харчової сировини, тому й наявний низький рівень збереження її харчової цінності та якості [22].

Крім того, у багатьох випадках використовується застаріле вимірювальне обладнання різних фірм виробників, навіть кустарного виробництва. У зв'язку з цим режими кулінарної обробки іноді далекі від раціональних, що тягне за собою перевитрати електроенергії і невідповідність якості готової продукції [23], тому соціально значущим питанням є не лише збереження сировини, а й дослідження процесів теплообміну і вдосконалення апаратів, у яких здійснюється теплова обробка [24].

Для ефективної розробки технологічного обладнання необхідно застосовувати математичні моделі того процесу, який буде використовуватися в цьому обладнанні. Отже, важливим є створення математичної моделі параметрів технологічної обробки сировини [21].

Сам характер нагрівання (охолодження), як і швидкість нагрівання або охолодження продукту пов'язані із теплофізичними властивостями продуктів харчування, то ж їх

ґрунтовне вивчення в кожному випадку є складним і недоцільним. Більш ефективною є комп'ютеризація наукового експерименту і його математичне моделювання.

Розробляти вимірювальне обладнання – це дорогий та довготривалий процес, саме тому запропоновано зосередитися на розробці вимірювальних датчиків та алгоритмів обробки даних [25].

Алгоритми обробки даних – це універсальний інструмент, що може функціонувати в *трьох різнонаправлених програмах*: програма математичного моделювання Maple (або аналог), оператор баз даних Access (або аналог), табличний процесор (MS Excel або аналог).

Але серед згаданих вище програм загальнодоступною є лише MS Excel, тому було вирішено файли розрахунків та математичних моделей технологічних процесів створювати саме у вигляді таблиць (у форматі *.xls).

Таким чином, можна стверджувати, що у наукових дослідженнях змін реологічних та теплофізичних властивостей продуктів харчування тваринного походження не враховано можливостей цифрових вимірювальних приладів та сучасного програмного забезпечення і не охоплено теплофізичних властивостей продуктів, що містять харчові добавки.

1.2. Вибір реєструючого вимірювального блоку

Для автоматичної фіксації результатів дослідження використовують реєструючі вимірювальні пристрої в комплекті із відповідними датчиками.

На вітчизняному ринку цифрового вимірювально-реєструючого обладнання для лабораторій навчальних закладів з можливістю підключення сторонніх вимірювальних датчиків присутні три основні виробники: National Instruments, Phywe та ITM.

Американська компанія National Instruments (NI) поставляє професійне та навчальне обладнання для більшості вимірювальних процесів [26], але суттєвим недоліком є велика

вартість та необхідність знання інструментів графічного програмування. Апаратне і програмне забезпечення компанії NI призначене, в основному, для досліджень у сфері електроніки та інженерії [27] і його складно адаптувати до досліджень продуктів харчування.

Наприклад, продукт Virtual Bench (рис. 1.2), що містить комплекс вбудованих електротехнічних приладів, дозволяє підключення лише тензометричних динамометрів [28], що значно звужує їх застосування при дослідженні структури харчових продуктів.



Рис. 1.2. Апаратна частина обладнання Virtual Bench компанії National Instruments. Комплектація для ПК на ОС серії Windows (зліва) та для роботи з пристроями на платформах iOS та Android (справа)

Інтегровані контролери Compact DAQ містять власний багатоядерний процесор з модульною системою введення/виведення даних, дозволяють управління вимірюваннями з комп'ютера оператора через загальноприйняті мережеві інтерфейси (Ethernet, Wi-Fi) або через USB (рис. 1.3).



а

б

Рис. 1.3. Вимірювальна платформа Compact DAQ компанії National Instruments з варіантами підключення через USB (а) та через Ethernet (б)

Проте обладнання Compact DAQ має можливість підключення периферійних датчиків тільки через створений NI інтерфейс Compact, що підвищує точність і надійність роботи вимірювального блоку, проте значно ускладнює та здорожує розробку датчиків сторонніми виробниками [26].

Німецький виробник Phywe пропонує навчальні вимірювальні прилади Cobra 3 та Cobra 4 (рис. 1.4). Цифрова лабораторія Cobra призначена для проведення вимірювання, контролю й регулювання фізичних та хімічних процесів [30], що дозволяє адаптувати її до досліджень якості харчових продуктів.



Cobra 3



Cobra 4 (комплектація Expert-Link)

Рис. 1.4. Вимірювальні блоки Phywe

Компанія Phywe також виготовляє мобільні блоки з акумуляторами, здатними до автономної фіксації показників на SD-карту (без використання ПК). Наприклад, поширеним у природничих лабораторіях шкіл країн ЄС [31] є блок Cobra 4 Mobile-Link (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Вимірювальний блок Cobra 4 (комплектація Mobile-Link)

Оскільки Cobra 4 призначено для визначення фізичних та хімічних параметрів різних середовищ, то, на перший погляд, його використання для досліджень харчових продуктів є оптимальним варіантом. Проте можливість підключення лише одного датчика та запатентований інтерфейс звужують застосування приладу до одночасної фіксації лише одного показника, з чим успішно справляються і промислові лабораторні прилади.

Окремі лінійки приладів Phywe (наприклад, набори для експериментів TESS) спеціально виготовлені у вигляді конструктора для адаптації під конкретні цілі наукових експериментів [32]. Проте вимірювальні прилади Phywe працюють лише із оригінальними датчиками.

Опосередкована робота, наприклад, при дослідженні структури методом перентрації означатиме, що на дисплеї ПК буде відображено графік зміни опору тіла за часом, який необхідно перевести в силу через градуювальну шкалу, що дозволяє легко маніпулювати результатами експерименту.

Оскільки науковці все частіше намагаються отримати не лише результати експерименту, а й доказову базу, то від продуктів компанії Phywe вирішено було відмовитися.

Вітчизняна компанія ТОВ «ІТМ» вже понад десять років виробляє вимірювальне обладнання для демонстрації та проведення експериментів. Універсальний вимірювальний прилад ІТМ (УВКП) є спеціальною системою для комп'ютеризації фізичного та хімічного експериментів. УВКП складається з електронного блоку, набору датчиків та програмного забезпечення для сумісної роботи з персональним комп'ютером.

Електронний блок виготовлено в металевому або в пластмасовому корпусі розміром 260x150x45 мм. На верхній поверхні корпусу розташовано чотири входи типу DB-15, що призначені для підключення зовнішніх пристроїв (аналогових та цифрових датчиків, устаткування). Зовнішній вигляд УВКП наведено на рис. 1.6.



Рис. 1.6. Вимірювальний блок УВКП ІТМ

Універсальний вимірювальний прилад ІТМ випускається у трьох варіантах: із 10, 12 та 16-розрядним аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП).

На правій боковій поверхні корпусу знаходиться вхід типу USB для підключення до комп'ютера. Обмін даними між комп'ютером та електронним блоком, а також живлення електронного блоку і датчиків, що входять до комплекту поставки, здійснюється через шнур USB А-В.

Слід зазначити, що програмне забезпечення частини професійних вимірювальних приладів потребує вдосконалення. Зокрема, під час виконання досліджень було використано професійний пірометр DT-8855 із безпроводним модулем DT-EM (рис. 1.7).



Рис. 1.7. Пірометр Dt-8855 із безпроводним модулем DT-EM

Програмне забезпечення без провідного модуля дозволяє фіксувати температуру із частотою 1 вимірювання/с і надавати результати у вигляді графіка температура/час. Проте при спробі імпорту результатів до табличного процесора MS Excel 2003 відкриваються порожні листи. Слід зазначити, що українські сервісні центри не займаються програмним забезпеченням пірометра DT-8855.

Водночас спеціалісти компанії ІТМ після надсилання заявки виправили недоліки в ПЗ «Лабораторія МІГ-1.3», що остаточно переконало авторів у виборі такого вимірювально-реєструвального приладу, як універсальний вимірювальний комп'ютерний прилад ІТМ (УВКП).

Універсальний комп'ютерний вимірювальний прилад забезпечує виконання таких функцій:

- вимірювання фізичних величин;
- запис (збереження) результатів вимірювання;
- відображення результатів вимірювань у вигляді цифрового табло, таблиць, графіків (на екрані комп'ютера або проекційному екрані);
- експорт даних вимірювання у форматі Excel та текстового редактора Word;
- синхронний запис даних вимірювань, відеозображень та звуків у ході експерименту;
- можливість зміни часового проміжку під час вивчення записів швидкоплинних та довготривалих процесів;
- одночасне вимірювання декількох фізичних величин;
- активація процесу вимірювань за амплітудою вимірюваного сигналу або імпульсом зовнішньої синхронізації;
- керування допоміжними зовнішніми приладами (нагрівачами, електромагнітами, двигунами тощо);
- створення мультимедійного проекту експерименту (у складі текстового файлу опису, відеоролика з поясненнями сутності експерименту, групи файлів з даними ходу експерименту) з можливістю подальшого відтворення на будь-якому комп'ютері.

1.3. Технічні характеристики та можливості приладу МІГ-1.3

На базі універсального вимірювального приладу (УВКП) виробництва ТОВ «ІТМ» розроблено вимірювальний прилад «Лабораторія МІГ-1.3» (МІГ-1.3), особливістю і перевагою якого є модульність. Тобто для визначення конкретних властивостей до вимірювального блоку підключається певний набір датчиків та зовнішніх пристроїв, а у програмі «Лабораторія МІГ-1.3» активується режим роботи із відповідним модулем [33].

Принцип роботи «Лабораторії МІГ-1.3» заснований на перетворенні сигналів датчиків вимірювання фізичних величин на цифрові дані та їх подальшій обробці. Сигнали від аналогових та цифрових датчиків підключаються до відповідних входів електронного блоку. Із входів сигнали подаються на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП). Дані, отримані від АЦП, через порт USB передаються до комп'ютера. Алгоритм роботи електронного блоку задається програмно [4].

Робочий діапазон АЦП знаходиться в межах 0–5 В. Для вимірювань сигналів з більшою амплітудою застосовують зовнішні дільники напруги. Подача до входів пристрою сигналів, які перевищують $\pm 12\text{В}$, можуть вивести з ладу вхідні кола електронного блоку. Забороняється вмикати та вимикати датчики під час роботи програми.

Основні режими роботи вимірювального блоку УВКП «Лабораторія МІГ-1.3» :

1. «Робота з вимірювальним приладом» забезпечує можливість проведення вимірювань з доступом до меню налагоджень. Ввімкнення цього режиму роботи здійснюється за допомогою ярлика «налаштування».

2. «Бібліотека експериментів» забезпечує демонстрацію попередньо записаних експериментів. Використовується у випадках, коли проведення реального експерименту неможливе або є недоцільним. Ввімкнення цього режиму роботи також здійснюється за допомогою ярлика «ІТМ Лабораторія МІГ-1.3».

3. «Експеримент». Призначений для проведення експериментальних досліджень на аналоговому устаткуванні. При активованому режимі роботи вимірювального пристрою доступ до меню налагоджень неможливий. Активація режиму здійснюється ярликом «ІТМ Лабораторія МІГ-1.3» «Excel» на робочому столі комп'ютера.

4. Користувач має можливість проводити вимірювання, зберігати результати, здійснювати експорт даних до електронних таблиць Excel.

Модуль містить: вимірювальний блок, набір датчиків, зовнішні пристрої. На сьогодні вже розроблено 6 модулів: «Реологія», «Поверхня», «Оптика», «Теплота», «Електромагнітний модуль» та «Фотомодуль». Детальну характеристику модулів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Методи досліджень, які проводять з використанням приладу МІГ-1.3

Властивості	Модуль приладу	Напрямок дослідження	Комплектація приладу
Реологічні	Модуль «Реологія»	Гранична напруга зсуву, модуль Юнга, коефіцієнт міцності, коефіцієнт Пуассона	МІГ-1.3 з 16-розрядним АЦП, динамометр з підсилювачем
	Модуль «Реологія»	Релаксація	Динамометр, штатив з лінійкою
	Модуль «Реологія»	В'язкість	МІГ-1.3 з 10-розрядним АЦП, два однакові динамометри
Властивості поверхні	Модуль «Поверхня»	Межа міцності поверхні	Динамометр із різними інденторами

Розділ 1. Загальна характеристика вимірювального та реєструючого обладнання

Закінчення табл. 1.1

Властивості	Модуль приладу	Напрямок дослідження	Комплектація приладу
	Модуль «Поверхня»	Адгезія, когезія	МІГ-1.3 з 16-розрядним АЦП, динамометр з підсилювачем
Магнітні властивості	Електромагнітний модуль	Магнітна проникність	Датчик магнітного поля, котушка індуктивності
Оптичні	Модуль «Оптика»	Каламутність	МІГ-1.3 з 16-розрядним АЦП, установка ESPE-1, оптичний датчик направлений
	Модуль «Оптика»	Динаміка седиментації	МІГ-1.3 з 16-розрядним АЦП, установка ESPE-1, оптичні датчики направлені, оптичний датчик нефелометричний
Теплофізичні	Модуль «Теплота»	Теплопровідність, теплоємність, теплопередача, густина теплового потоку	МІГ-1.3 з 16-розрядним АЦП, термодатчик оригінальної конструкції, термометр-щуп
Геометричні (розміри)	Фотомодуль	Вимірювання відстаней і фіксування процесів	МІГ-1.3, USB-мікроскоп, веб-камера

Розроблені модулі багатofункціональні у застосуванні. Наприклад, модуль «Оптика» може бути використаний: при вимірюванні розмірів частинок з точністю до 0,0001 мм; при дослідженні прозорості речовини; при визначенні швидкості осідання частинок; коефіцієнта поглинання світлового потоку; оптичних властивостей прозорих, напівпрозорих матеріалів та металів. До комплектації модуля «Оптика» входять додаткові пристрої, характеристика яких надана в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Характеристика оптичних засобів вимірювання

Тип приладу	Найменування	Збільшення	Роздільна здатність матриці	Ціна поділки, мкм
Мікроскоп цифровий	SDM	x500	1600x1200	0,0001
Мікроскоп цифровий	AVG 351un	x84–x400	1600x1200	–
Мініскоп	MG-10085-1A	x100	–	0,02
Оптична лінійка	МПБ-2	x24	–	0,05

Отже, найбільш прийнятним оптичним приладом для використання у модулі «Оптика» «Лабораторії МІГ-1.3» є USB-мікроскоп MG-10085.

Управління зовнішніми пристроями вимірювальним блоком УКВП «Лабораторія МІГ-1.3»

Функція «Управління зовнішніми пристроями» значно розширює можливості вимірювального комплексу. Користувач може не тільки отримувати результати вимірювань, але й виконувати деякі дії за результатами вимірювань. Такими діями можуть бути: стабілізація температури, керування нагріванням, охолодженням, вмикання-вимикання електромеханічних пристроїв тощо. Передбачено 4 канали керування. На виході каналу керування може встановлюватися високий або низький рівень сигналу. Канали керування при потребі об'єднують за допомогою логічних елементів з робочими рівнями стандарту TTL. Канали керування мають номери 1–4. Їх виведено на відповідні контакти 1–4 роз'ємів для підключення датчиків [4].

Канали 1–3 мають КМОП вихідний каскад, а канал 4 – з відкритим стоком. Максимальний струм навантаження – 5 мА на канал. Ємність навантаження – не більш 50 пФ. Розглянемо робоче вікно «Зовнішні пристрої» програми «Лабораторія МІГ-1.3» (див. рис. 1.8).

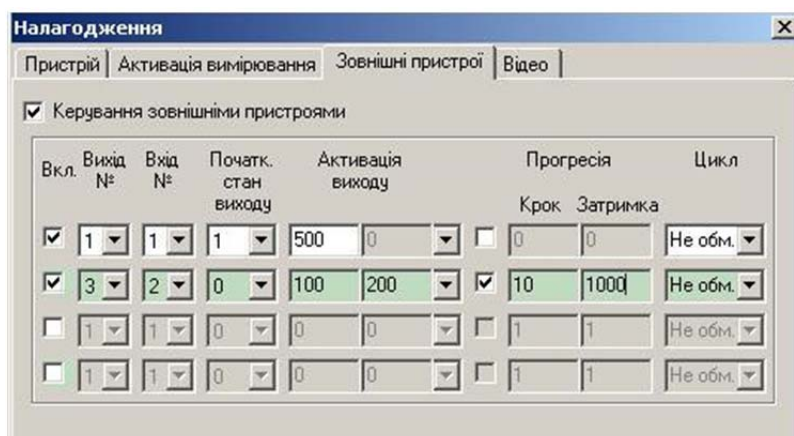


Рис. 1.8. Вікно «Зовнішні пристрої» програми «Лабораторія МІГ-1.3»

Для налагодження алгоритмів керування зовнішніми пристроями необхідно активувати вкладку «Зовнішні пристрої» функціонального вікна «Налагодження». Активація режиму здійснюється встановленням позначки «V» – «Управління зовнішніми пристроями», після чого програма відслідковуватиме наявність підключених пристроїв, дані вимірювань та параметри, за якими здійснюється керування. Варто вибрати один або декілька каналів керування. Для цього у рядку каналу необхідно встановити «V». Номер виходу повинен відповідати номеру на роз'ємі зовнішнього пристрою. На відміну від датчиків, зовнішні пристрої можна підключати на будь-який вільний вхід модуля.

Розглянемо приклад налагодження одночасної роботи з двома зовнішніми пристроями.

– Перший канал керування: пристрій підключено до виходу № 1; керування здійснюється за показами датчика, що підключений до входу № 1; початковий стан виходу – «1» (після включення процесу вимірювання на виході № 1 встановлюється логічний рівень «1» стандарту TTL); коли вимірювана величина сягне значення «500», стан виходу зміниться на «0».

– Другий канал керування: пристрій підключено до виходу № 3; керування здійснюється за показами датчика, що підключений до входу № 2; початковий стан виходу – «0». Після включення режиму вимірювання вихід № 3 перебуватиме

у стані «0». Якщо вимірювана величина буде збільшуватися й сягне значення «200», вихід змінить стан на «1», що приведе до відключення пристрою. Після цього вимірювана величина зменшуватиметься до значення «100», а потім стан виходу зміниться на «1».

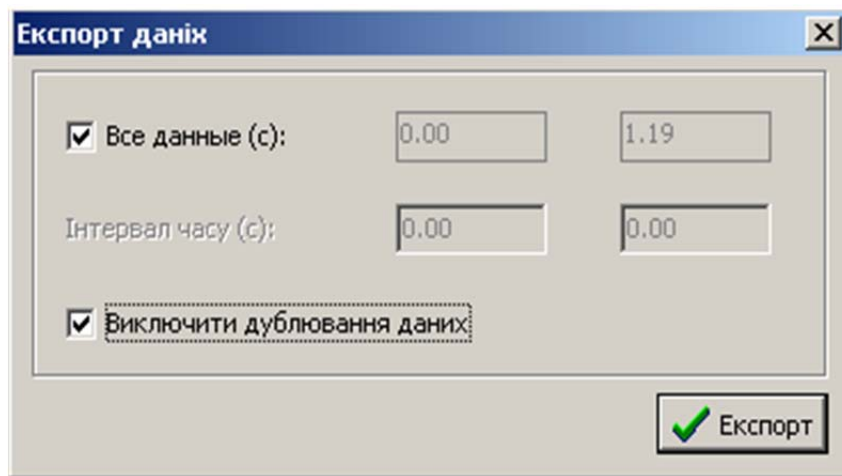
Процес підтримки вимірюваної величини у заданому вікні буде повторюватись циклічно. Однак цей режим динамічний. Вимірювання фізичних величин під час постійної зміни одного з параметрів призводить до додаткових похибок. Для уникнення таких похибок передбачено квазістатичний режим керування. Для переходу у квазістатичний режим потрібно встановити «V» функціональному режиму «Прогресія», а також параметри режиму. Параметр «Крок» задає інтервал зміни вимірюваної величини (у одиницях вимірювання), після чого здійснюється тимчасова стабілізація, що триває протягом встановленої затримки. Час затримки є кратним періоду вимірювання. Якщо у вікні «Затримка» встановлено 1000 мс, а період вимірювання дорівнює 500 мс, то затримка становитиме 500 с.

Наприклад, під час керування роботою нагрівача отримаємо такі параметри роботи зовнішнього пристрою:

- максимальна температура нагрівання – 200 °С;
- крок нагрівання – 10 °С;
- після кожного збільшення на 10 °С температура стабілізується протягом 500 с;
- коли температура сягне значення 200 °С, нагрівання припиниться і почнеться процес охолодження зі стабілізацією рівня температури з вищевказаними кроком і затримкою;
- зменшення температури до 100 °С зумовить зміну режиму роботи пристрою і процес нагрівання почнеться знову;
- кількість циклів можна встановити у останній комірці налагодження каналу управління. У цьому випадку кількість циклів не обмежена. Це означає, що керування зупиниться після виходу з режиму «Вимірювання».

Експорт даних вимірювання до електронних таблиць

Після отримання експериментальних даних необхідно експортувати їх до програми «Excel» для подальшої обробки. Для цього необхідно натиснути екранну кнопку «Excel», розташовану у другому рядку меню програми. На екрані з'явиться вікно «Експорт даних». За замовчуванням екпортується весь масив даних. Якщо потрібно експортувати лише частину даних, необхідно прибрати позначку «V» «Всі дані» і встановити бажаний проміжок часу. Той же результат можна отримати, якщо попередньо виділити необхідну ділянку графіка. Позначка «Виключити дублювання даних» видаляє з масиву, що екпортується, однакові дані, які дублюють однакову точку на графіку.



*Рис. 1.9. Вікно «Експорт даних» програми
«Лабораторія МІГ-1.3»*

Дані вимірювань кожного датчика екпортуються у вигляді масиву на окремій сторінці «книги Excel». Слід пам'ятати, що табличний процесор має обмеження. Тому кількість точок одного графіка або його фрагменту, що екпортується до Excel, не повинна перевищувати 65535.

1.4. Розроблення датчиків та програмного забезпечення

При конструюванні модулів «Лабораторії МПГ-1.3» автори вимушені були вирішувати проблему швидкісного вимірювання температури в тонких шарах харчової сировини [34].

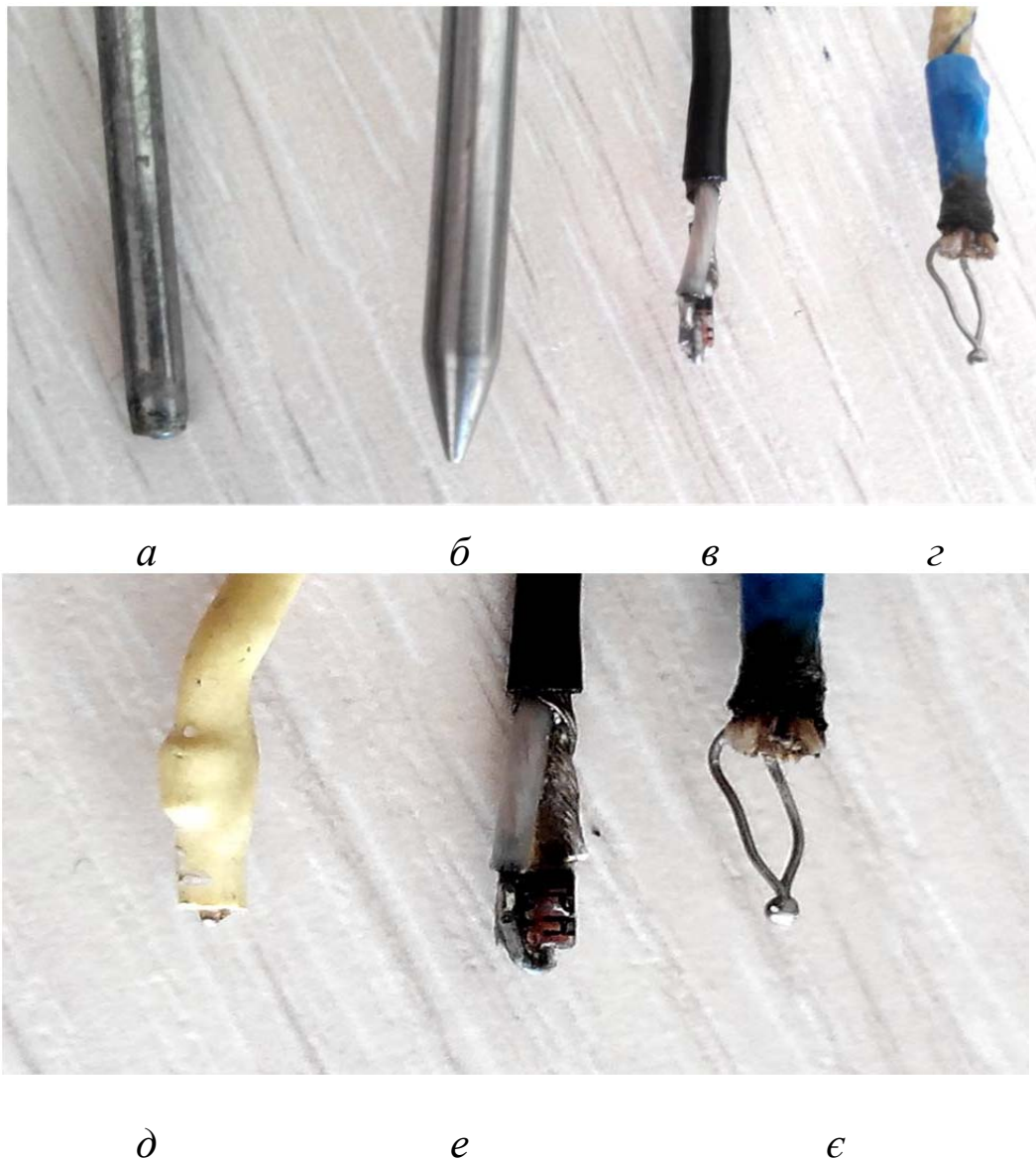
Незважаючи на великий асортимент приладів для вимірювання температури контактним способом, у більшості з них використовуються однакові термодатчики, які можна умовно поділити на дві групи: закриті (або щупи) і відкриті (здебільшого термопари).

На рис. 1.10 наведено зображення датчиків температури, які використовуються на кафедрі інженерно-технічних дисциплін КНТЕУ під час роботи з тепловим полем.

У закритих датчиках чутливий елемент розміщується в металевій або скляній колбі, що запобігає пошкодженню з боку зовнішнього середовища та різних механічних ушкоджень. Проте метал або скло вносять суттєву похибку при швидкоплинному вимірюванні температури. Час реакції термощупів, які автори намагалися використати у дослідженні, становить 1,5 та 6,2 с (рис. 1.10 а, б). Окрім того, великі розміри захисної колби спотворюють температурне поле всередині продукту, адже створюються канали для передачі теплового поля (метал має менший термоопір, ніж більшість харчових продуктів).

При дослідженні впливу теплового поля на харчові продукти важливим є отримання реальних показників температури в реальному часі. Адже через незначну товщину шарів продукту коливання показів термопари навіть на один градус може внести суттєву похибку в результати вимірювання.

Для визначення теплофізичних властивостей біологічних об'єктів та харчових продуктів використовуються переважно термістори [35–36], проте нелінійність характеристик напівпровідникових і висока інертність показників металевих термоопорів значно ускладнюють їх застосування для динамічного дослідження температури в окремих шарах продуктів харчування.



*Рис. 1.10. Термодатчики
(а – термощуп ITM DT-10r; б – термощуп KI&BNT WT-2,
в – розроблений термодатчик, г – термопара К-типу;
д – розроблений термодатчик у термоусаджувальному
рукаві, е – робочий діод розробленого датчика;
є – термопара К-типу (для порівняння розмірів)*

Під час використання термісторів у харчовій промисловості при безперервному виробництві нелінійність показників промислово виготовлених датчиків не ускладнює процес вимірювання [35]. Проте в лабораторних умовах для дослідження

властивостей різних харчових продуктів використання термісторних датчиків, особливо виготовлених невеликою партією, значно ускладнює заміну датчика, крім того, необхідність ізоляції вимірювального напівпровідника вносить суттєву похибку – збільшує інертність показників.

Новим є використання плівкових термоопорів для дослідження теплофізичних властивостей. Плівкові температурні датчики, особливо металокерамічні, мають лінійний температурний коефіцієнт опору, широкий діапазон вимірюваних температур та малий час реакції [37].

Використання плівкових нагрівачів разом із датчиками дозволяє одночасно визначати тепло- і температуропровідність речовин. Так, ученими під керівництвом Huang L. розроблено установку для дослідження теплофізичних властивостей харчової сировини та продуктів харчування [38]. Результати апробації установки свідчать про ефективність запропонованого методу, але автори проводили дослідження при кімнатних температурах, тому відсутні дані змін тепло- і температуропровідності під час термічної обробки.

У наукових колах широке розповсюдження набули діоди завдяки високій лінійності, діапазону робочих температур, що повністю охоплює температури приготування та зберігання продуктів, та компактним розмірам. Групою учених під керівництвом С. Jungreuthmaier використано схему вимірювання температури стінок на вищезгаданих діодах при постійній напрузі [39]. Проте така схема досить складна у реалізації та доцільна лише за умов роботи датчика у діелектричному середовищі (наприклад, у повітрі). При підвищенні провідності середовища підтримувати сталу напругу на датчику із такою схемою живлення дуже складно. Крім того, збільшується частка струму, який проходить через середовище, що унеможлиблює характеристику самого діода.

При використанні напівпровідникових діодів для вимірювання температури важливо підтримувати постійне значення або напруги, або струму. Вимірявши значення іншої електричної величини, можна визначити температуру діода, а відповідно, і середовища, де він знаходиться [40].

У розробці датчика використано роботи Г.Я. Зеленова, зокрема схему вимірювання температури р–п переходом [41]. Проте значно змінено схему живлення з метою використання спеціально розроблених для вимірювання температури діодів КТУ84-1.

Науковцями кафедри інженерно-технічних дисциплін КНТЕУ разом із ТОВ «ІТМ» розроблено діодні термодатчики, що відповідають зазначеним вимогам [34].

У датчику встановлено вимірвальний діод КТУ84-1 компанії Philips. Розроблений термометр дозволяє вимірювати температуру середовища контактним способом в діапазоні $-40\dots+180\text{ }^{\circ}\text{C}$.

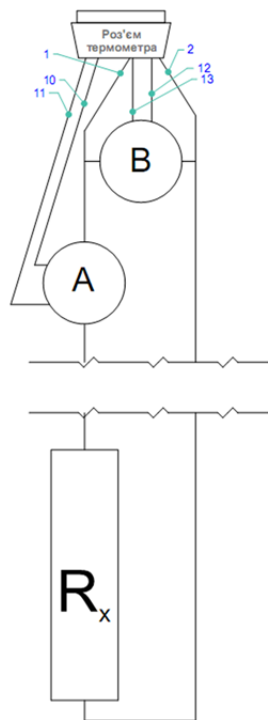


Рис. 1.11. Принципова схема напівпровідникового термометра

Принцип роботи термодатчиків заснований на функціональній залежності опору напівпровідникового резистора від частоти температурного поля (рис. 1.11). На схемі термометра цифрами позначено номери контактів у роз'ємі. Такий термометр надає змогу вимірювати температуру середовища контактним способом в діапазоні $-40\dots+280\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Датчики мають розмір вимірвальної частини близько 2,5 мм, завдяки чому можуть вимірювати температуру всередині шару продукту товщиною від 5 мм.



Рис. 1.12. Дослідна партія датчиків

Максимальна температура, при якій зберігається лінійна залежність температури термодатчика, – 214°C , проте при досягненні температури близько 180°C зростає ризик розплавлення припою на діоді та пошкодження датчика, саме тому межі вимірювання розроблених датчиків штучно обмежені на 160°C .

Прототипом розробленого датчика була схема температурного датчика із лінійними характеристиками [42]. Основні зміни були внесені для корекції роботи діода КТУ84-1, а також для зниження напруги живлення до 5 В з метою живлення через інтерфейс USB [34].

Схему розробленого датчика наведено на рис. 1.13.

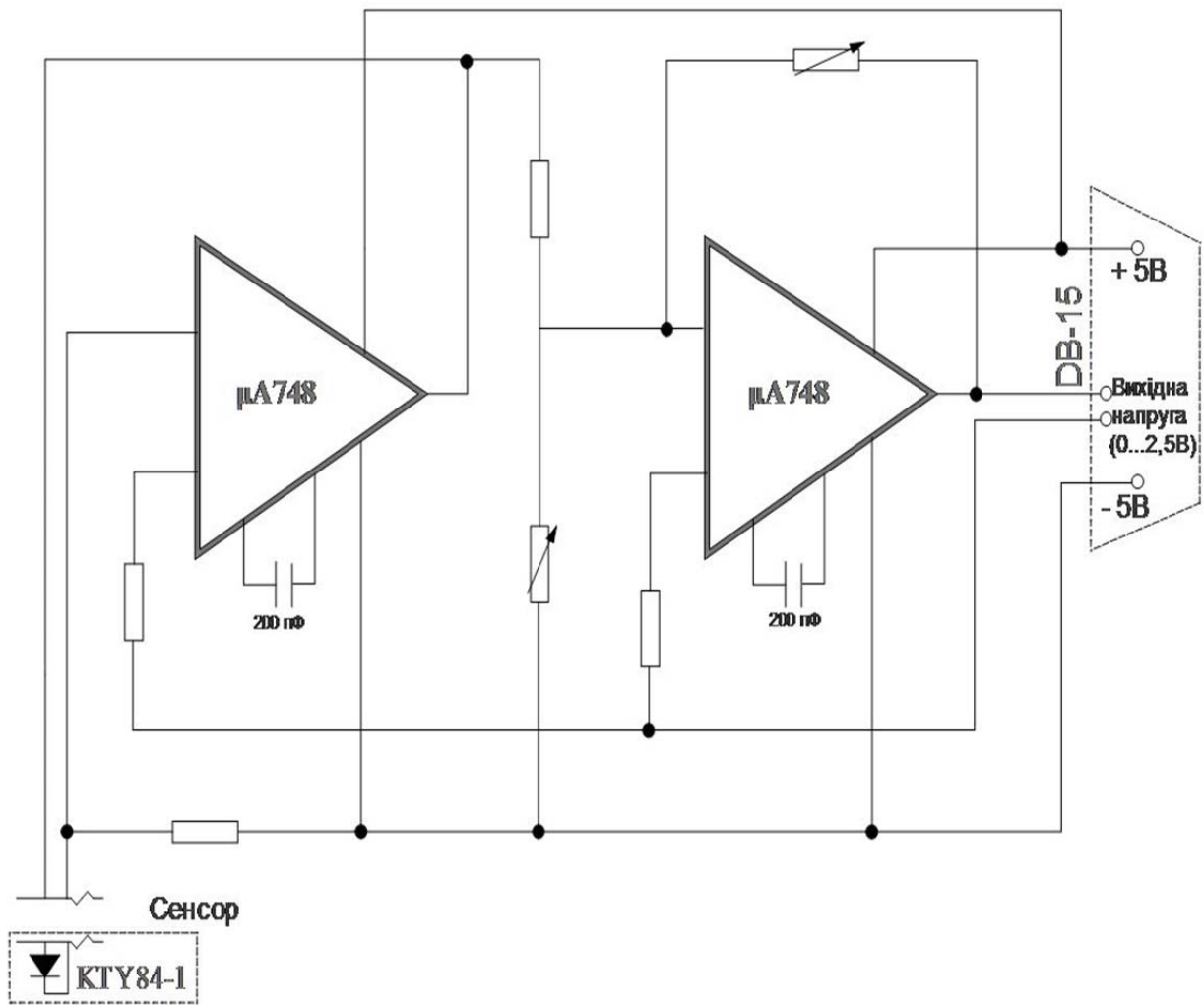


Рис. 1.13. Схема термодатчика для дослідження теплофізичних властивостей шарів харчових продуктів

Розроблений термометр має суттєвий недолік, що сто-сується більшості термопар та напівпровідникових термо-метрів, а саме – додаткова напруга, що виникає внаслідок хімічної реакції між металом відкритих контактів діода та продуктом, що вносить суттєву похибку в результати вимірювання температури. Одним із способів усунення цього недоліку є герметизація датчика у скляній чи силіконовій капсулі, але при цьому суттєво зменшується швидкість

реакції датчика та збільшуються його лінійні розміри. Крім того, внаслідок значної теплопровідності скла скляна капсула створює «температурні містки» всередині продукту, що ускладнює визначення теплофізичних властивостей.

Для вирішення цієї проблеми сенсорний діод датчика було поміщено до термоусаджувальної стрічки (рис. 1.9 д), проте це лише уповільнило час реакції та збільшило лінійні розміри датчика, не вирішивши згаданої вище проблеми.

Більш перспективним шляхом подолання такої перешкоди стала розробка програмного алгоритму компенсацій. Так, у створеному датчику напруга, що виникає в процесі реакції контактів термометра із середовищем, та втрати напруги через провідність досліджуваного середовища частково компенсуються вимірюванням опору діода у частотному діапазоні 50...50000 Гц із періодом повтору частот 0,5 с.

Для перевірки алгоритму компенсації проведено вимірювання температури лимона (кисле середовище), зануреного у лужну мінеральну воду протягом 5 год. Оскільки температури м'якоті лимона та мінеральної води вирівнялися, то різниця показників розробленого термодатчика вказує на максимальне відхилення, спричинене електрохімічними реакціями та витокком струму із контура датчика.

Розроблений ТОВ «ІТМ» алгоритм виявився досить ефективним: так, різниця у визначенні температури у діапазоні (+4...47 °С) склала 0,15...0,21 °С. Для порівняння різниця показів термопари К-типу за тих самих умов знаходилася у діапазоні 0,2...0,7 °С. Як бачимо, алгоритм компенсації працює лише у разі підключення термодатчиків до універсального вимірювального комп'ютерного приладу (МІГ-1.3) ІТМ на цифровий вхід. Проте навіть без компенсаційного алгоритму різниця показників розробленого датчика порівняна із різницею показників термопари К-типу.

Порівняльну характеристику датчиків наведено у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

**Порівняльна характеристика приладів для визначення
температури**

Показники	Модель			
	KI&BNT WT-2	JT-168 (термопара К-типу)	DT-10r (МІГ-1.3)	Напівпро- відниковий (МІГ-1.3)
Діапазон температур, °C	-50...+300	-40...+420	-30...+210	-40...+180
Роздільна здатність, °C	0,1 (<200 °C)	0,1	0,05	0,05
Похибка вимірювання, °C	±1,0 (-50 ... +80 °C); ±5,0 (>80 °C)	±3,0 (>0 °C) ±1,0 (0 ... +150 °C); ±2,0 (>150 °C)	±1,0 (-30 ... +100 °C); ±1,5 (>100 °C)	±1,0
Запис показника	+ (макс. та мін. значення)	-	+ (63 999 значень)	+ (63 999 значень)
Період вимірювання, с	5	1	1...600	0,5...300
Індикація обриву датчика	+	-	+	+
Можливість переградування	+ (по 2 точках)	-	+ (довільне градування)	+ (довільне градування)
Додаткові функції	Вимірюється в °F	-	-	ПЗ для компенсації впливу середовища

Одним із пріоритетних напрямів подальших досліджень є розробка алгоритму зменшення впливу коливань температури теплоносія у робочій камері. Це дозволить спростити проведення досліджень теплофізичних властивостей харчових продуктів не лише у термостатичній шафі, а й у промислового теплового устаткуванні, де амплітуда коливань температури сягає 5 °C.

Градування термодатчиків здійснювалося відповідно до ТУ У 31.3-30591280-001-2004 [43]. Приклад калібрувальної таблиці та калібрувального графіка наведено на рис. 1.14–1.15.

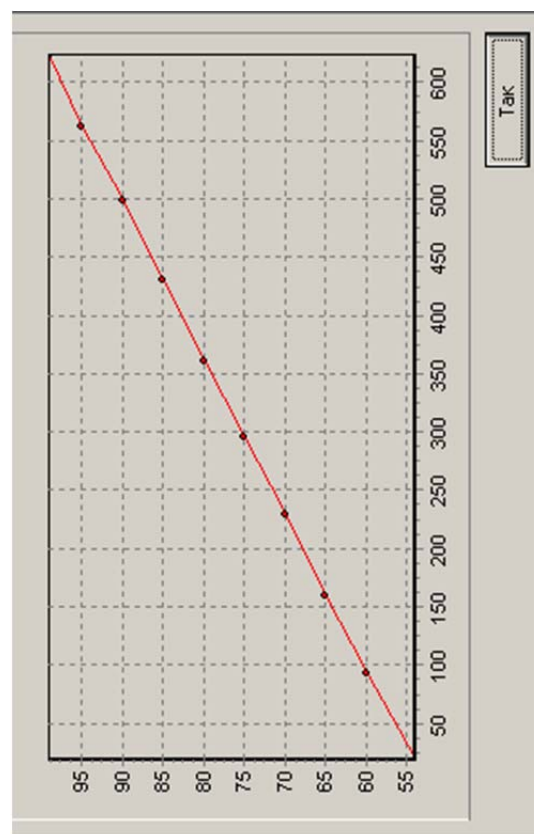
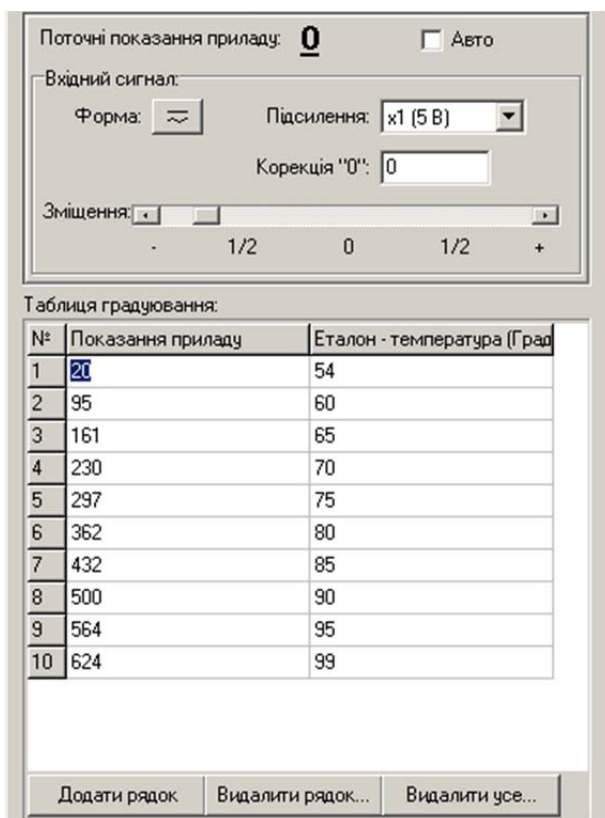


Рис. 1.14. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Калібрувальна таблиця розробленого термодатчика на 10-розрядному АЦП

Рис. 1.15. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Калібрувальний графік електронного термометра

Розроблені датчики мають пряму залежність рівня вихідного сигналу від температури у діапазоні, тому для градування датчика достатньо двох точок.

Розділ 2

БУДОВА, КОМПЛЕКТАЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДУЛЯ «РЕОЛОГІЯ» ПРИЛАДУ МІГ-1.3

2.1. Теоретико-методологічні основи дослідження структурно-механічних властивостей сировини та матеріалів

У розробку модуля «Реологія» покладено теоретичні основи деформації тіла. Оскільки йдеться про тіла різної твердості, то деформація є важливою товарознавчою характеристикою досліджуваного об'єкта. В основу реології як науки покладено структурно-механічні властивості деформованого тіла.

Перед дослідженням об'єктів експериментатор повинен чітко уявляти, які процеси будуть відбуватися і якого алгоритму дій необхідно дотримуватися під час експерименту. Для цього насамперед необхідно розробити фізичну модель досліджуваного процесу, що надаватиме опис явищ на молекулярному рівні, адже пристрій МІГ-1.3 дозволяє фіксувати протікання процесу в інтервалі тисячної секунди.

Після опису важливим є вибір експериментального методу дослідження, який передусім спрямований на дослідження закономірностей деформації і руйнування досліджуваного об'єкта.

Дослідження можуть мати декілька напрямів:

- при простому чи складному напруженому стані;
- при статичних, динамічних, циклічних навантаженнях;
- при низьких чи високих температурах;
- в умовах впливу на досліджуваний об'єкт зовнішнього середовища;
- при наявності силових, теплових, електромагнітних полів [43].

Метою таких досліджень є перевірка справедливості гіпотез і теорій деформації досліджуваного тіла для отримання максимальної інформації про механічну поведінку об'єкта, характер взаємодії із зовнішнім середовищем, визначення механічних характеристик.

Згідно з основними напрямками можна згрупувати методи досліджень:

- методи аналітичних досліджень справедливості гіпотез і теорій;
- методи визначення механічних характеристик матеріалів;
- методи досліджень напружено-деформованого стану об'єктів;
- методи контролю якості.

В основі роботи модуля «Реологія» є дослідження:

- закономірностей деформування і руйнування матеріалів і сировини в умовах лінійного, осьового навантаження;
- закономірностей деформування і руйнування матеріалів і сировини в умовах плоского, двохосьового навантаження;
- закономірностей деформування і руйнування матеріалів і сировини в умовах об'ємного, трьохосьового навантаження.

Всі три методи ґрунтуються на осьовій деформації – вздовж одної осі, двох чи трьох. Суть методу осьової деформації в тому, що зразок необхідно деформувати вздовж осі розтягом або стисненням. Якщо розглянути зразок, то під час деформації виникають сили, зображені на рис. 2.1.

Отже, під час деформації розтягу спостерігається не лише видовження зразка, а й зміна форми зразка, яку характеризує коефіцієнт Пуассона, що пов'язує відносне видовження об'єкта з його відносним зменшенням товщини. Цей коефіцієнт є важливим при дослідженнях пружних властивостей об'єктів, особливо харчових, бо вказує на пружні властивості, відповідно, зв'язаний із якісними характеристиками. Для здійснення точних вимірювань відносної деформації досліджуваного об'єкта та розрахунку коефіцієнта Пуассона до УВКП приєднується лінійка з лазерним променем, завдяки якому і виконуються точні вимірювання видовження зразка $\Delta \ell$.

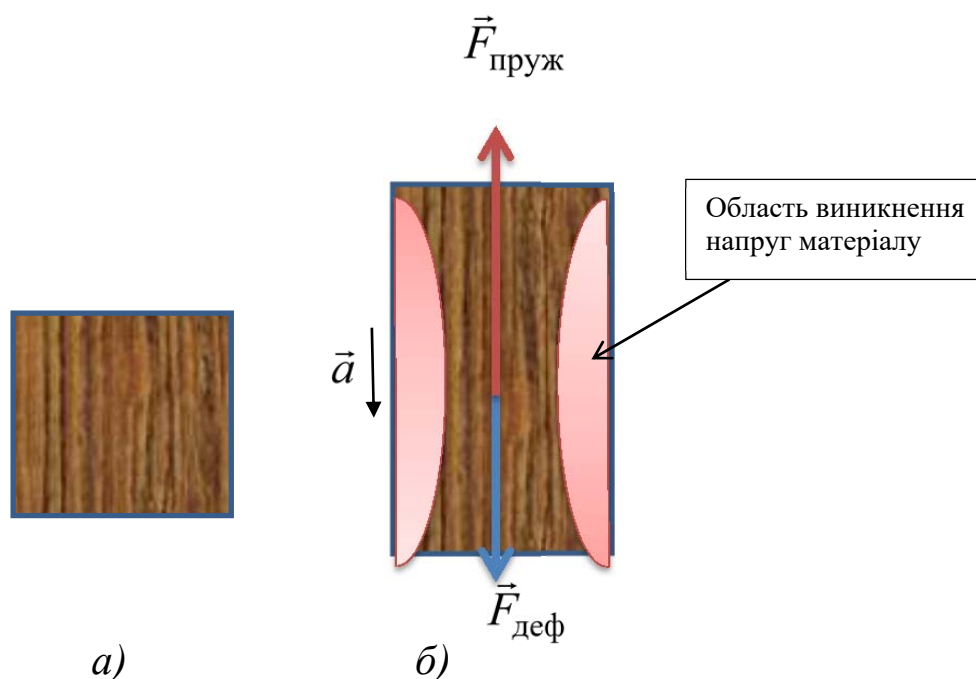


Рис. 2.1. Схема виникнення сил деформації і пружності та напрямку деформаційного прискорення:
 а) недеформований зразок; б) деформований зразок методом розтягу

Розглядаючи деформацію розтягу зразка з позицій класичної механіки, необхідно зазначити, що згідно з другим законом Ньютона рівнодійна всіх сил має такий математичний запис [45]:

$$\vec{F}_{\text{рів}} = \vec{F}_{\text{пруж}} + \vec{F}_{\text{деф}}, \quad (2.1)$$

де $\vec{F}_{\text{деф}}$ – деформаційна сила, Н;

$\vec{F}_{\text{пруж}}$ – сила пружності, що виникає в деформованому тілі, Н;

$\vec{F}_{\text{рів}}$ – рівнодійна всіх сил, що діють на дане тіло, Н.

Якщо зразок деформувати зі сталою швидкістю, то рівнодійна сила дорівнюватиме нулю, отже, формула (2.1) набуде такого вигляду:

$$0 = -F_{\text{пруж}} + F_{\text{деф}}, \quad (2.2)$$

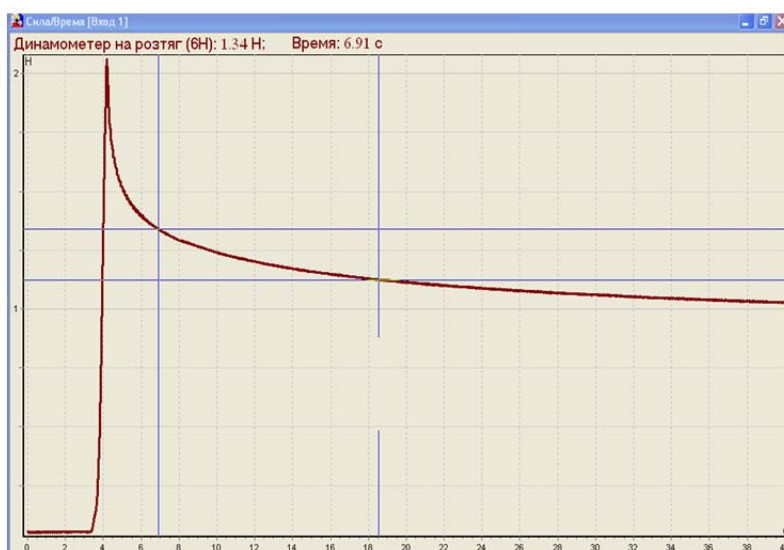
тобто
$$F_{\text{пруж}} = F_{\text{деф}}, \quad (2.3)$$

отже, $k\Delta x = F_{\text{деф}}$, (2.4)

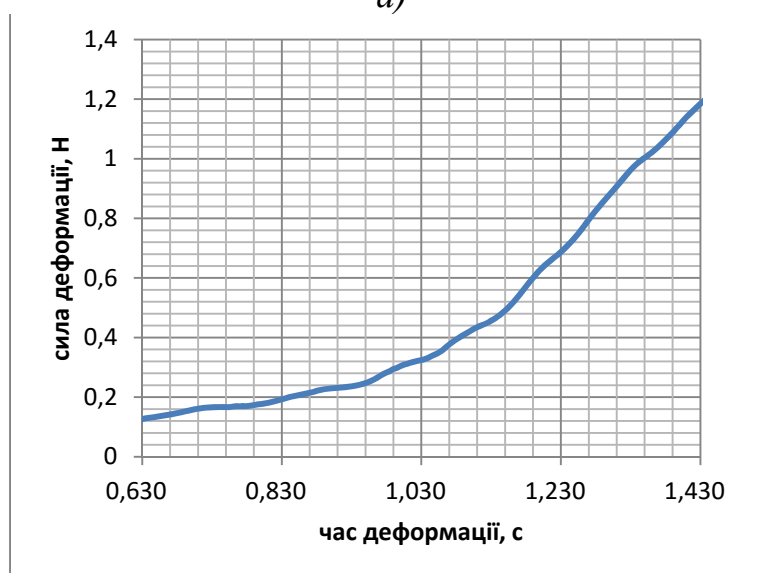
де k – коефіцієнт пружності матеріалу, Н/м;

$\Delta x = \Delta \ell$ – видовження зразка під дією деформаційної сили, м.

Деформаційна сила фіксується приладом МІГ-1.3 [46, 60] в реальному часі. Зовнішній вигляд програмного вікна зображено на рис. 2.2 а.



а)



б)

Рис. 2.2. Робоча панель «Навчальної лабораторії»: а) при проведенні експерименту в реальному часі; б) графічна залежність деформаційної сили від часу, опрацьована в програмі Excel

Зображене навчальне вікно з графіком залежності деформуючої сили від часу під час осьової деформації. Розтяг зразка відповідає процесу навантаження на зразок деякої маси (сили) [4, 47]. Величина маси або деформуючої сили зчитується за піком діаграми (рис. 2.2), як і час деформування (стискання) самого об'єкта. Релаксація об'єкта, тобто його відновлення, графічно має вигляд кривої. За рівнянням кривої отримуємо зміну релаксаційної сили в часі; рівняння швидкості відновлення досліджуваного об'єкта; прискорення, з яким цей об'єкт повертається у своє початкове положення. Отримані експериментальні рівняння є не що іншим, як математичними моделями деформаційного процесу.

При використанні площинного методу деформації потрібно розглянути систему рівнянь, кожне з яких є рівнянням осьової деформації [51].

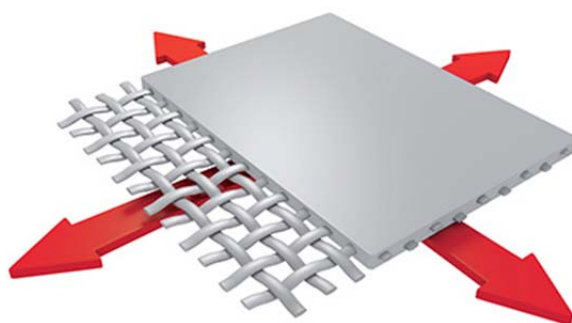


Рис. 2.3. Схеми площинної осьової деформації довільного зразка

Особливої уваги заслуговує торцеве стиснення зразків циліндричної форми, що є одним із важливих способів лабораторних досліджень для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів. Важливого значення набувають ці дослідження у харчовій промисловості, де однією із реологічних характеристик продукту є його пластичність. Вивчення деформації матеріалу та встановлення закономірностей пластичної формозміни можуть бути покладені в основу вдосконалення технологічного процесу [4, 50].

Під час нестационарних процесів на бічній поверхні циліндричного зразка при торцевому стисненні визначають ε – ступінь деформації та q – питоме зусилля під час стиснення залежно від ступеня деформації. Як зазначає Михалевич В.М. [52, 54], деформація торцевого стиснення мало вивчена, бо під час процесу стиснення необхідно розглядати об’ємну деформацію. Крім того, існує мало методів щодо дослідження такої деформації, особливо в товарознавстві як продовольчих, так і непродовольчих товарів.

У Київському торговельно-економічному університеті завдяки багатофункціональному модульному пристрою МІГ-1.3 на модулі «Реологія» проводяться дослідження реологічних властивостей сировини та матеріалів методом торцевого стиснення [53].

Деформаційне стиснення можна охарактеризувати показником деформаційного стиснення n , який свідчить про здатність матеріалу до зміцнення під час пластичної деформації. Показник n чисельно дорівнює максимальному рівномірному видовженню ε_p та визначається під час дослідження на розтяг за допомогою співвідношення (2.5):

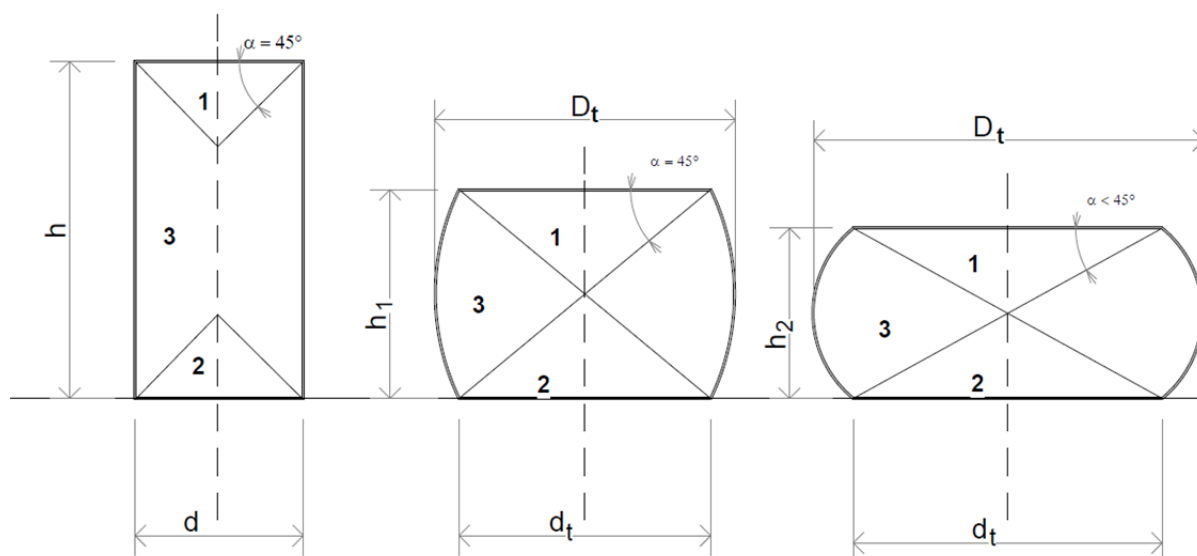
$$n = \varepsilon_h = 2 \ln \left(\frac{d_0}{d_b} \right), \quad (2.5)$$

де d_0, d_b – діаметр зразка до дослідження та в момент максимального навантаження,

$$d_t = d \cdot \sqrt{\frac{h}{h_t}}, \quad D_t = \sqrt{\frac{V}{0.262 \cdot h_t} - d_t^2}, \quad (2.6)$$

де h_t – висота зразка в певний момент часу деформування;
 V – об’єм зразка до деформування.

Під час торцевого стиснення зразка спостерігається набуття бочкоподібної форми і залежно від величини стиснення отримують різні кути при вершині торця зразка (див. рис. 2.4).



D_t – діаметр бочки; d_t – діаметр контактної поверхні зразка

Рис. 2.4. Модель формозміни під час стиснення з використанням ефекту «осаджувального хреста» за В.М. Михалевичем

Для більшості сировини ступінь деформації залежить від величини пластичності матеріалу. Пластичність – це властивість тіл незворотно деформуватися без руйнування під дією механічних навантажень або внутрішніх напружень. Пластичність залежить від властивостей матеріалу: характеру між-атомних зв’язків, хімічного і фазового складу, кристалічної структури і мікроструктури, а також умов деформації – температури, електричного струму; величини і схеми прикладених сил (напруженого стану) та швидкості їх прикладання. Пластичність не є фізичною чи механічною сталою матеріалу, а лише характеризує його стан. Для товарознавства важливим є встановлення залежності пластичності сировини та матеріалів від їх якості, умов та терміну зберігання. Як міру пластичності широко використовують накопичену пластичну деформацію [49].

Зазначимо, що пластичність є комплексною характеристикою матеріалу і дійсно залежить від багатьох факторів, зокрема і від напрямку напружено-деформаційного стиснення, швидкості деформації, температури, наявності електромагнітного поля.

2.2. Релаксаційне зусилля при осьовій деформації стиску

Релаксація – це явище відновлення матеріалу після зняття впливу зовнішніх факторів деформації. Проте деякі матеріали під час навантаження можуть зміщувати шари один відносно одного, що викликає додаткові відхилення, які потрібно враховувати при розрахунках [56, 59].

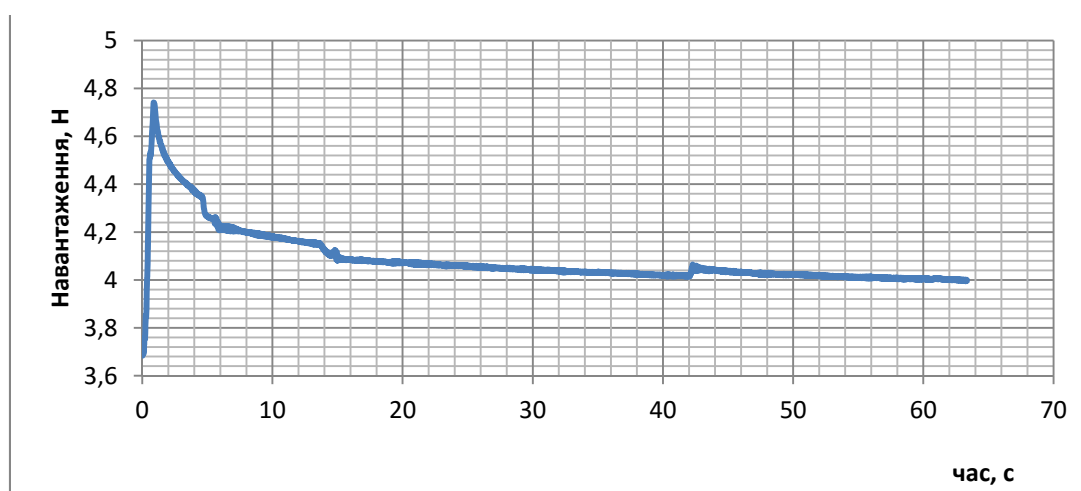


Рис. 2.5. Графік деформаційного навантаження та релаксаційного відновлення зразка габаритного розміру

Суть методу полягає у стисканні зразків продуктів однакових габаритних розмірів на однакову величину і порівнянні релаксаційного зусилля дослідного зразка з релаксаційним зусиллям контрольного зразка. Під час стискання зразків вимірюється сила пружності зразка (F_c) як функція часу.

Дослідження виконується на 16-розрядному МІГ-1.3. Як датчик доцільно використовувати динамометр із електронним підсилювачем та цифровим демпінгуванням даних. Межа вимірювання вищезгаданого динамометра – 3,3 Н, ціна поділки – $5 \cdot 10^{-5}$ Н [4,53].

Оскільки визначення релаксаційного зусилля передбачає отримання одного масиву даних, має бути не менше 3000 експериментальних точок. Щодо харчових продуктів необхідно зазначити, що повторення досліджень на даному зразку є недоцільним, адже він має залишкову деформацію після першого навантаження. Далі масив даних опрацьовується за правилами математичної статистики із вибором рівняння регресії.

Схему установки для визначення релаксаційного зусилля зображено на рис. 2.6.

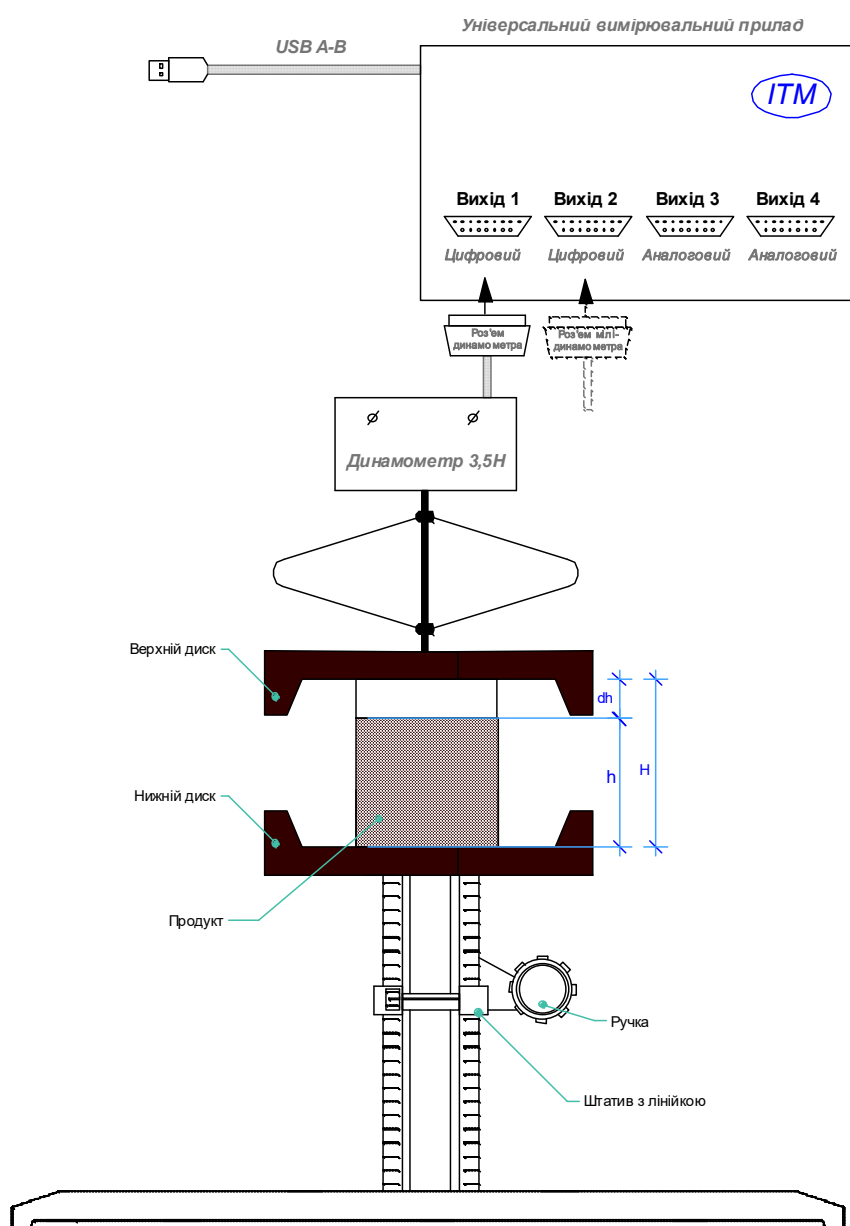


Рис. 2.6. Модуль «Реологія». Установка для визначення релаксаційного зусилля

Наведемо алгоритм виконання дослідження:

1. Підготувати досліджувані зразки у формі паралелепіпеда із розмірами сторін 20...30 мм. Важливо, щоб розміри зразків були однакові, якщо це неможливо, то слід перерахувати значення сили пружності пропорційно до площ поверхні зразків.

2. Зразки розміщують на нижньому диску (рис. 2.6), піднімають максимально близько до верхнього диску та стискають на 10...30% висоти зразка, попередньо почавши вимірювання.

3. Вимірювання зупиняють через 20...30 с, коли крива динаміки релаксаційного зусилля візуально перестане рухатися вниз, тобто фіксується стабілізація релаксаційних процесів.

4. На етапі експорту в MS Excel (для 16-розрядного МІГ-1.3) або під час попередньої обробки даних із отриманого масиву даних відсікаються пов'язані зі стискуванням зразка області (рис. 2.7, зона 1), а також частини графіка, де показання динамометра перевищувало його межу вимірювання (рис. 2.7, зона 2). Подальшій обробці підлягає масив даних, що описує зміну сили пружності за часом (dF/dt) (рис. 2.7, зона 3) та експортується до програми MS Excel.

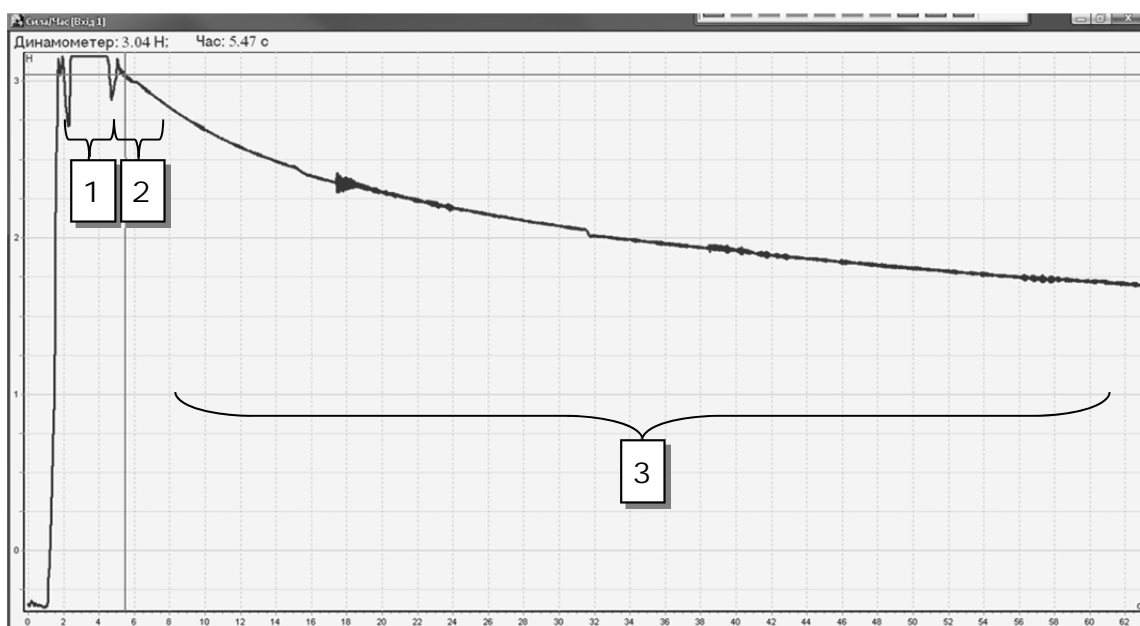


Рис. 2.7. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Визначення релаксаційного зусилля дослідного зразка

5. Здійснюється попередня обробка отриманих графіків у програмі MS Excel. Масиви даних, а на кожен зразок повинно бути не менше 3000 точок, змінюють до однакових розмірів – за найменшим масивом; отримані значення сили вносять в одну таблицю та замінюють вісь ординат (стовпчик часу), оскільки вимірювання релаксаційного зусилля починалося в кожному зразку з різного часу після початку вимірювань. Ціна поділки по осі ординат – 0,01 с, по осі абсцис – $(5 \div 50) \cdot 10^{-5}$ Н.

6. Регресійний аналіз отриманого масиву даних бажано виконувати в спеціалізованих програмах. Наприклад, аналіз даних виконано в програмі Advanced Grapher 5.5.

7. Шляхом підбору встановлюють характер рівняння регресії, що найкраще описує динаміку релаксаційного зусилля. Як правило, релаксаційне зусилля розроблених зразків переважно змінюється за ступеневим рівнянням (рис. 2.8), рідше – за натуральним логарифмом.

8. Для зручності сприйняття кутів при умові зміни пропорцій на рисунку бажано, крім декартової системи координат, навести і полярно кутову. На рис. 2.8. наведено полярну кутову систему з ціною поділки 0,1π.

Графіки релаксаційних зусиль поділяються на три зони:

- Перша зона від $\lim_{x \rightarrow 0}$ до початку вимірювання (в наведеному прикладі – 2,50 с). У цій зоні точно прогнозувати релаксаційне зусилля неможливо.

- Друга зона від початку до кінця вимірювання (в наведеному прикладі – 59,69 с), у ній значення сили пружності (F_c) вважається достовірним у межах похибки та за визначеного довірчого інтервалу.

- Третя зона (зона прогнозування) від кінця вимірювань до $x \rightarrow \infty$. У цьому проміжку відносно точний розрахунок релаксаційного зусилля можливий за визначеними функціями залежності релаксаційного зусилля від часу (рис. 2.8).

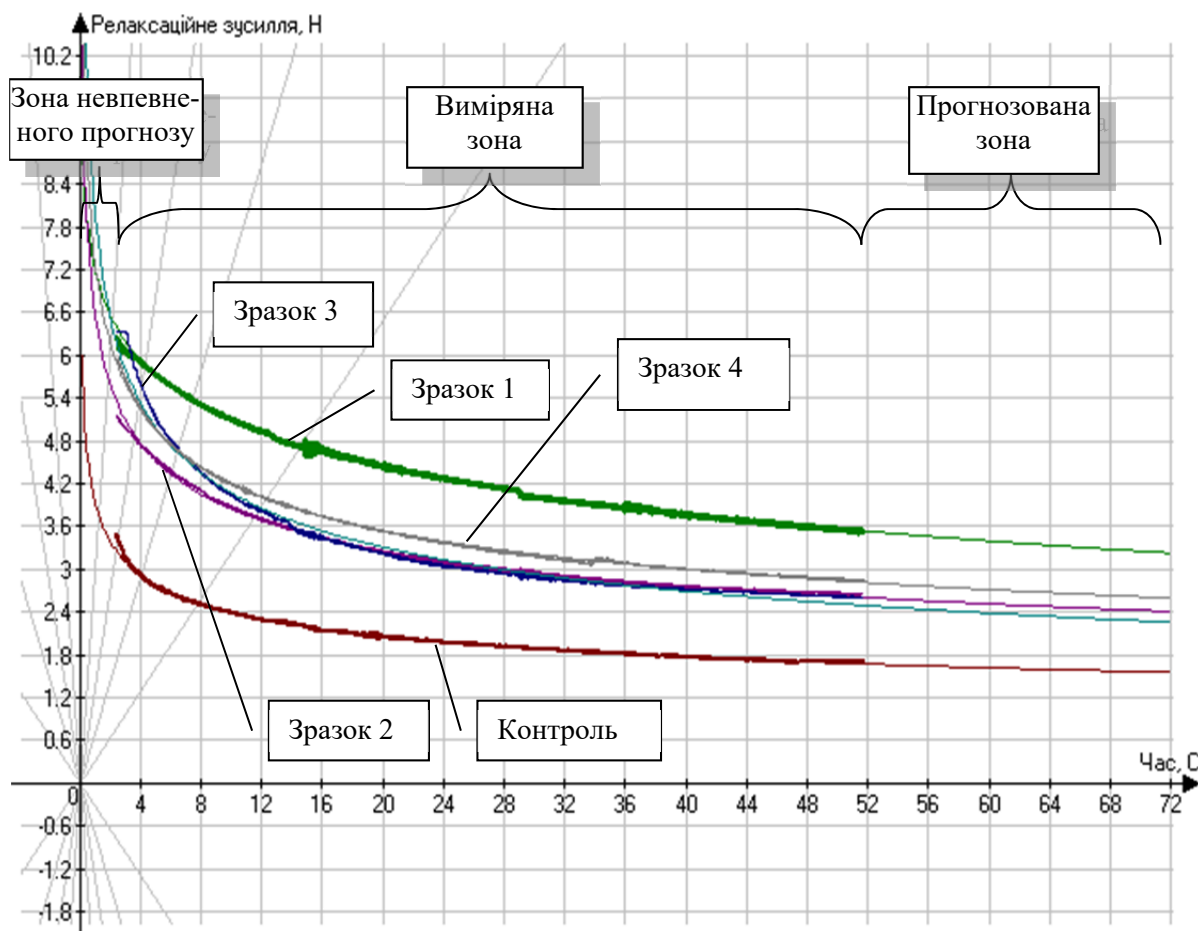


Рис. 2.8. Приклад регресійного аналізу релаксаційного зусилля борошняних виробів

9. Будують дотичні до кожного графіка зміни релаксаційного зусилля (рис. 2.8). Наведено приклад лише для зразка № 2 та контролю.

10. Після побудови дотичних та визначення їх рівнянь функції знаходять тангенси кутів (кут між дотичною і віссю ординат).

Для більш точного опису отриманої графічної залежності рекомендовано скористатися полярною системою координат.

2.3. Релаксація при осьовій деформації розтягу

Деформація розтягу відрізняється від деформації стиснення тим, що молекулярні структури видовжуються у напрямку деформації, стискаючи впоперек молекулярні ланцюги. Такі дії зумовлюють появу всередині зразка додаткових джерел тепла, що впливають на швидкість протікання релаксаційних процесів. Про теплове поле в деформованому зразку було відомо й раніше. Проте його фіксація була досить складною при використанні застарілого обладнання. Лише з появою модульної системи «Реологія» таке стало можливим (див. розд. 5).

Отже, для дослідження зразків на розтяг було використано обладнання, схема якого надана на рис. 2.9.

Досліджуваний зразок (1) затискається верхнім затискачем (3.1) і вільно звисає протягом 5–10 с для вирівнювання форми. Після чого до нього приєднується нижній затискач (3.2) та визначаються лінійні розміри зразка між затискачами.

Гвинтом обмежувача висоти (7) виставляється розмір в $1/5$ довжини зразка. Під час обертання ручки (4) по штативу (5) рівномірно опускається платформа разом з нижнім затискачем, доки обмежувач висоти (6) не зупинить гвинт (7).

Зразок перебуває у розтягнутому вигляді протягом зазначеного часу (під час проведеного експерименту – 60 с). Цифровий динамометр фіксує зміну сили в часі протягом всього експериментального періоду, що в цьому випадку становить 0,005 с. Отримані дані зберігаються в пам'яті вимірювального блоку ІТМ та експортуються до табличного процесора для подальшої обробки.

Опускання нижньої частини конструкції, на відміну від верхньої, запобігає передаванню вібрації від обертання ручки на динамометр, а також зменшує коливання рухомої частини самого динамометра [54].

Триточкова система стабілізації динамометра надає змогу компенсувати відхилення (β) між вектором навантаження (\vec{F}_{sp}) і вектором сили супротиву (\vec{F}_{rel}) до 5° при навантаженні до 6 Н.

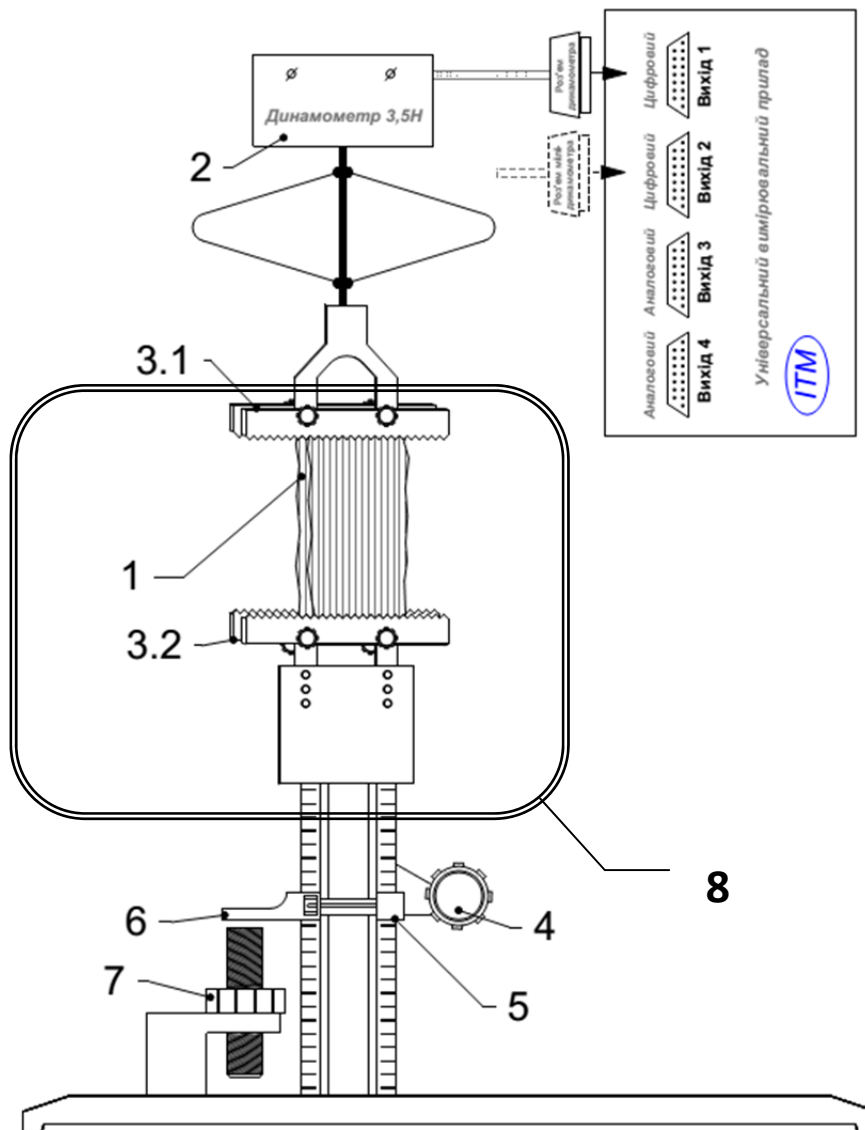


Рис. 2.9. Схема модуля «Реологія» приладу МІГ-1.3 для дослідження структурно-механічних властивостей на розтяг (1 – досліджуваний зразок, 2 – цифровий динамометр, 3.1 – верхній нерухомий затискач, 3.2 – нижній рухомий затискач, 4 – ручка для піднімання/опускання нижнього затискача, 5 – штатив з лінійкою, 6 – обмежувач висоти, 7 – гвинт обмежувача висоти, 8 – вимірювальна комірка)

Після розтягу зразка на певну величину (15...20% від початкової довжини) зразок перебуває в нерухомому стані. Процеси зміни та руйнування структури, що відбуваються в ньому, призводять до зменшення сили супротиву ($\overrightarrow{F_{rel}}$).

На зразок діє також його вага ($\overrightarrow{P_{smp1}}$). На рис. 2.10 для спрощення сприйняття точка прикладення ваги зразка зображена в центрі мас тіла, хоча повинна знаходитися в центрі верхнього затискача (рис. 2.9, 2.10). Але оскільки це стала величина, тому значення ваги ($\overrightarrow{P_{smp1}}$) зразка, як правило, менше 3...5% значення сил опору та навантаження. Прилад фіксує рівнодійну силу, тому акцентувати увагу на окремі сили відповідно до рис. 2.10 неварто, проте вони є вагомими при створенні фізичної моделі досліджуваного процесу та для глибокого розуміння самого явища на молекулярному рівні.

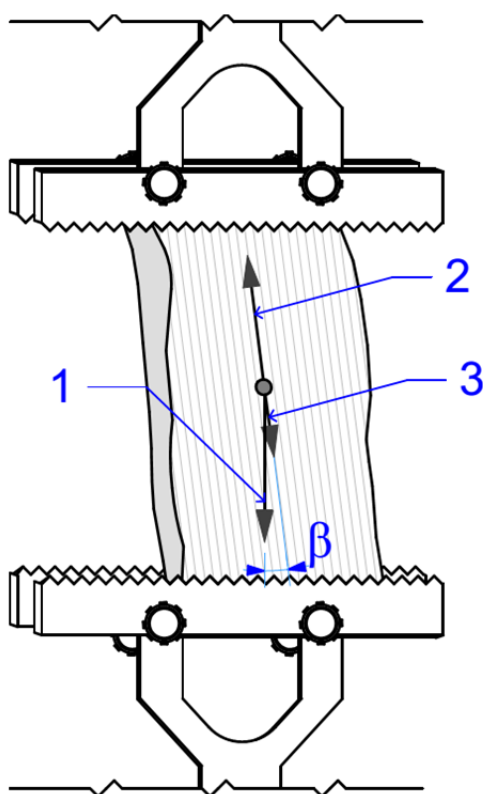


Рис. 2.10. Вимірвальна комірка розробленого приладу.
Схема взаємодії сил під час розтягу зразка м'яса вздовж волокон
(1 – навантаження ($\overrightarrow{F_{sp}}$); 2 – зусилля релаксації ($\overrightarrow{F_{rel}}$);
3 – вага зразка ($\overrightarrow{P_{smp1}}$))

Отже, після зупинки розтягу зразка рівнодійна всіх сил дорівнює нулю. При зменшенні сили опору (релаксаційного зусилля, \vec{F}_{rel}) зменшується і навантаження (\vec{F}_{sp}), яке фіксується цифровим динамометром у режимі реального часу.

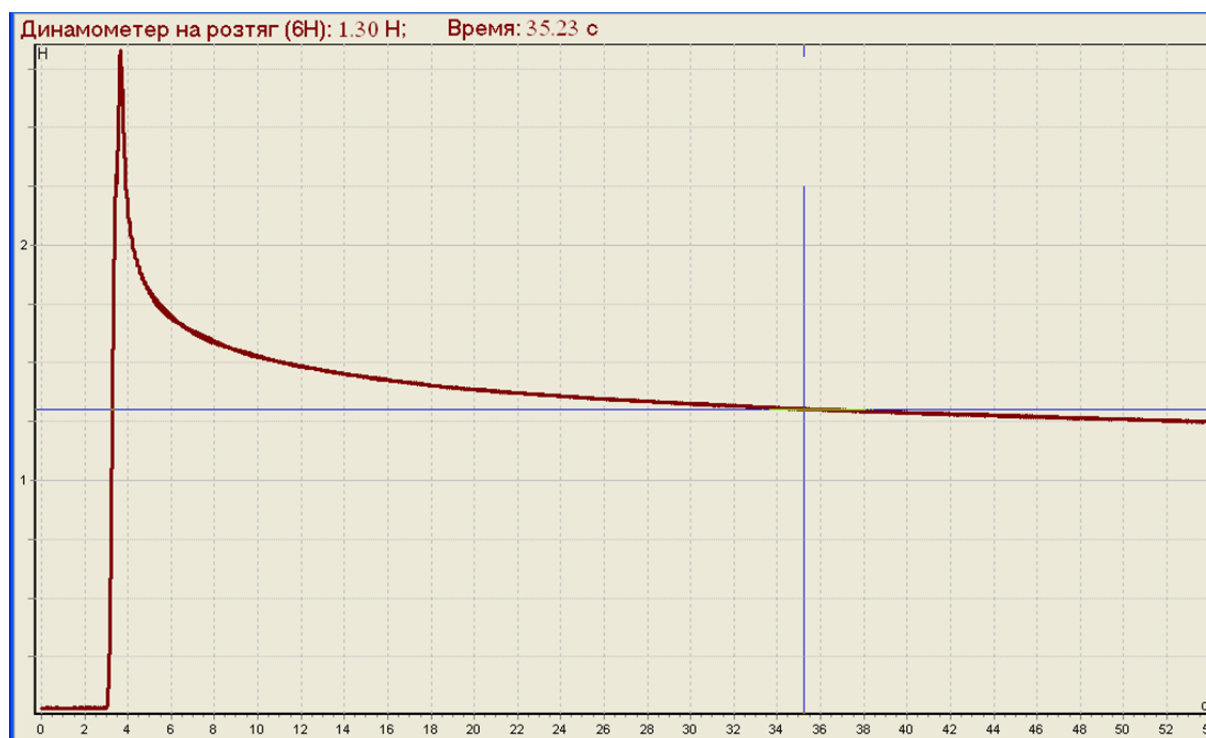


Рис. 2.11. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Діаграма деформування зразка під час розтягу

У подальшому дані експортувалися до табличного процесора для обробки. Вихідна діаграма деформування зберігається для журналу або протоколу досліджень.

Отримані релаксаційні діаграми на розтяг та стиснення дуже схожі між собою за формою, адже вони є протилежним відображенням одного і того ж процесу.

2.4. Дослідження термопружності

Термопружність виникає в зразку під час деформації. Найпростіше її спостерігати та описувати для пружних систем. Проте для харчової сировини і матеріалів вона теж є суттєвою товарознавчою характеристикою якості, як і структурно-механічні та теплофізичні характеристики.

Термопружність виникає в результаті перетворення енергії пружної деформації в теплову. Оскільки під час роботи модуля «Реологія» процеси протікають досить швидко, то в першому наближенні можна прийняти, що деформація відбувається при адіабатному процесі (без теплообміну) [55], коли відбувається зниження температури в зразку, тобто зразок віддає енергію. Таким чином, внутрішня енергія перетворюється в енергію пружної деформації (рис. 2.12).

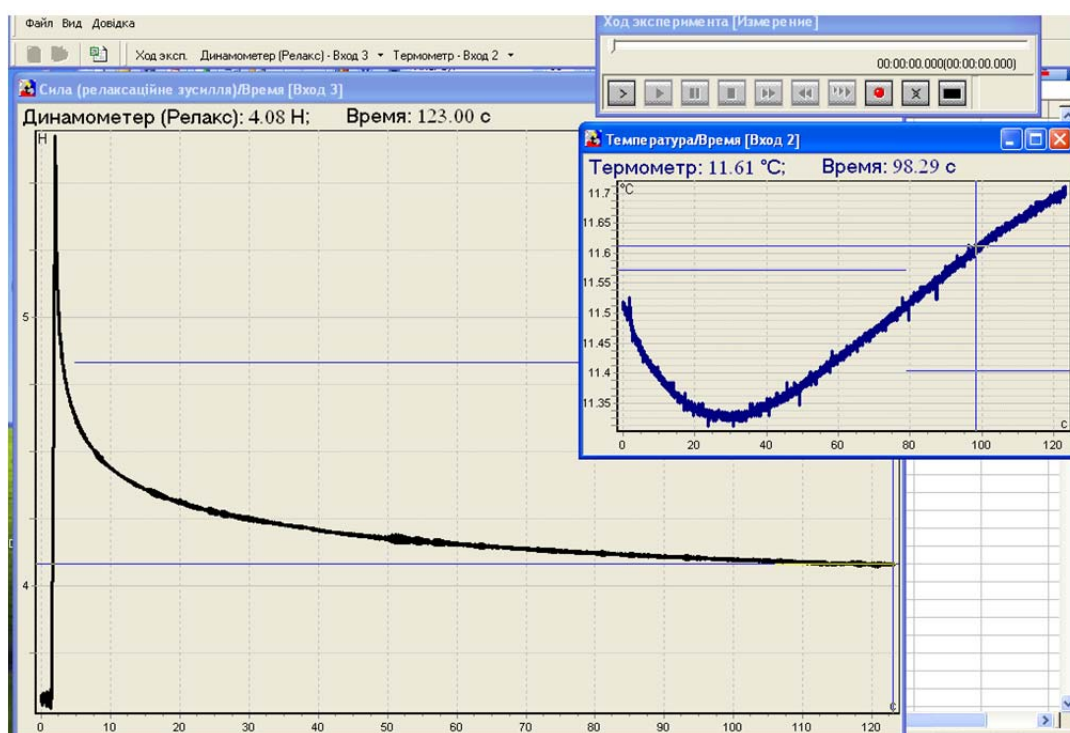


Рис. 2.12. Вікно програми при одночасній роботі цифрового динамометра та терморпарі, фіксація затрати енергії на деформацію

Саме зменшення температури фіксує перетворення енергії. Проте після настання релаксаційної рівноваги, що є зовнішнім фактором деформації, внутрішня деформація під дією виникнення внутрішнього теплового поля не припинилася, що і фіксує датчик. Спостереження, фіксація і експериментальні дослідження енергетичних перетворень належать до рівня молекул. Тобто прилад дозволяє досліджувати деформації на молекулярному рівні, а це означає можливість аналізувати вплив компонент на формування нових матеріалів та сировини.

Проте слід зауважити, що не завжди під час деформації температура знижується. Залежно від структури досліджуваного зразка, напрямку деформації відносно осі рівноваги тіла може відбуватися і зростання температури (рис. 2.13).

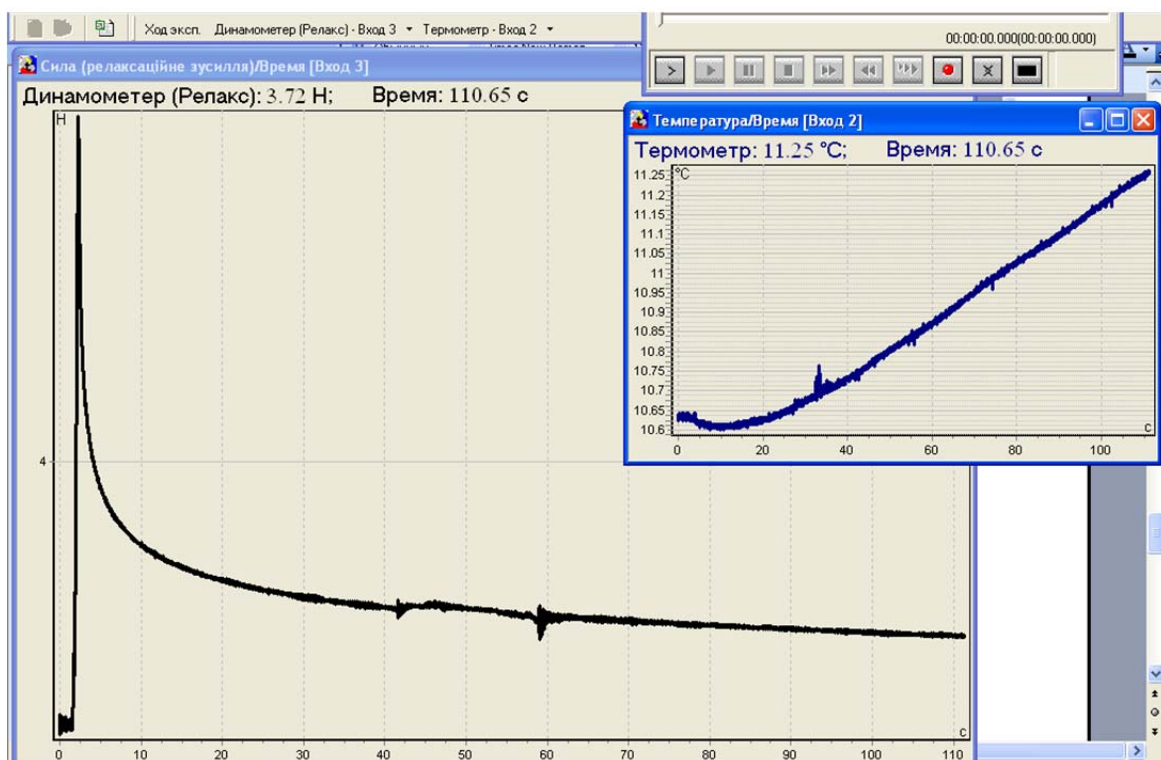


Рис. 2.13. Вікно програми при одночасній роботі цифрового динамометра та терморари, фіксація додаткової енергії під час деформації

У верхньому правому вікні поява додаткової температури свідчить про вивільнення внутрішньої енергії та наявність розривів молекулярних структур під час деформації. А отже, структура набула повної деформації в об'ємі тіла, що демонструє зміну і товарознавчих характеристик досліджуваних зразків [57].

2.5. Визначення граничної напруги зсуву за сталої швидкості зсуву

Пенетраційний метод дослідження структурно-механічних властивостей сировини та матеріалів є досить поширеним, зокрема в медицині, металознавстві, товарознавстві та інших галузях науки. Створено численну кількість приладів і пристроїв з метою фіксації швидкості зміщення молекулярних шарів у результаті дії різного роду деформуючих сил [58].

Прилад МІГ-1.3 дозволяє фіксувати не лише пенетраційне зусилля, необхідне для проникнення індентора в зразок, а й наявність вологи в зразку та можливість визначення коефіцієнта змочування цієї вологи з матеріалом індентора (рис. 2.14).

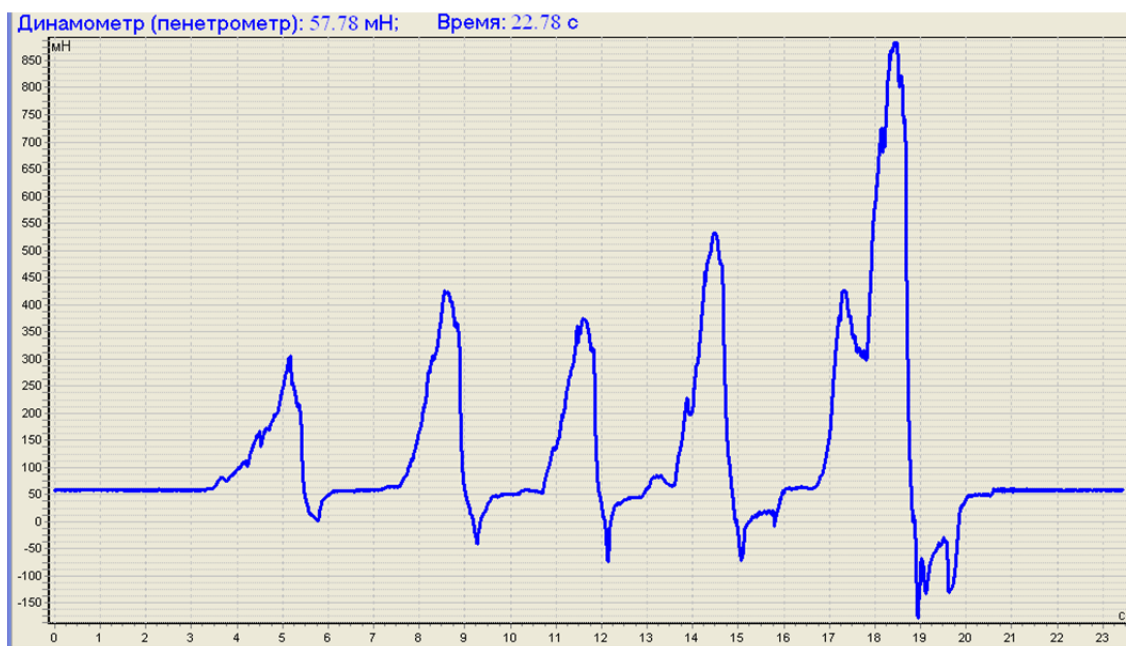


Рис. 2.14. Вікно програми з результатами роботи голчастого пенетрометра

Отже, як видно з рис. 2.14, верхні піки – це перетраційне зусилля, тобто деформаційна сила розриву під час проколювання зразка. Після винесення його із зразка прилад фіксує нижні піки, які і характеризують явище змочування. Це явище докладно вивчене, але автори досліджують харчову сировину і її продукцію, тому у такому разі нижні піки характеризують не лише наявність вологи у зразку, а й якісний склад сировини через виділену вологу під час роботи пенетрометра. Вивільнена речовина на хімічному рівні характеризує якісний склад сировини.

Оскільки фізичні методи дослідження дуже тісно пов'язані з хімічними методами, то, маючи результати хімічного аналізу виділеної речовини, можна встановити залежність якісних показників від фізичних властивостей, в тому числі і від коефіцієнта змочування досліджуваних об'єктів.

Дослідження залежності граничної напруги зсуву від температури

Удосконалений спосіб дослідження температурної залежності харчових продуктів полягає у використанні спеціального устаткування, яке складається з цифрового динамометра, МІГ-1.3, металевого індентора оригінальної конструкції, що має форму циліндра із напівсферою на нижній основі, в напівсферу запаяний германієво-кремнієвий термоелектроперетворювач, який виконує функції електронного термометра, що дозволяє визначити температуру окремих шарів продукту, а форма циліндру мінімізує перемішування рідини під час руху індентора (рис. 2.15).

Головним датчиком є циліндричний індентор-термометр, вкритий сталеву оболонкою, діаметром 3,2 мм, що фіксує температуру середовища, в якому опиняється лише за 5–10 с. Силу опору руху індентора визначали за допомогою мілідинамометра, вертикально переміщаючи продукт на штативі, одночасно фіксуючи температуру шару продукту, в який його поміщено.

Розділ 2. Будова, комплектація та принцип роботи модуля «Реологія» приладу МІГ-1.3

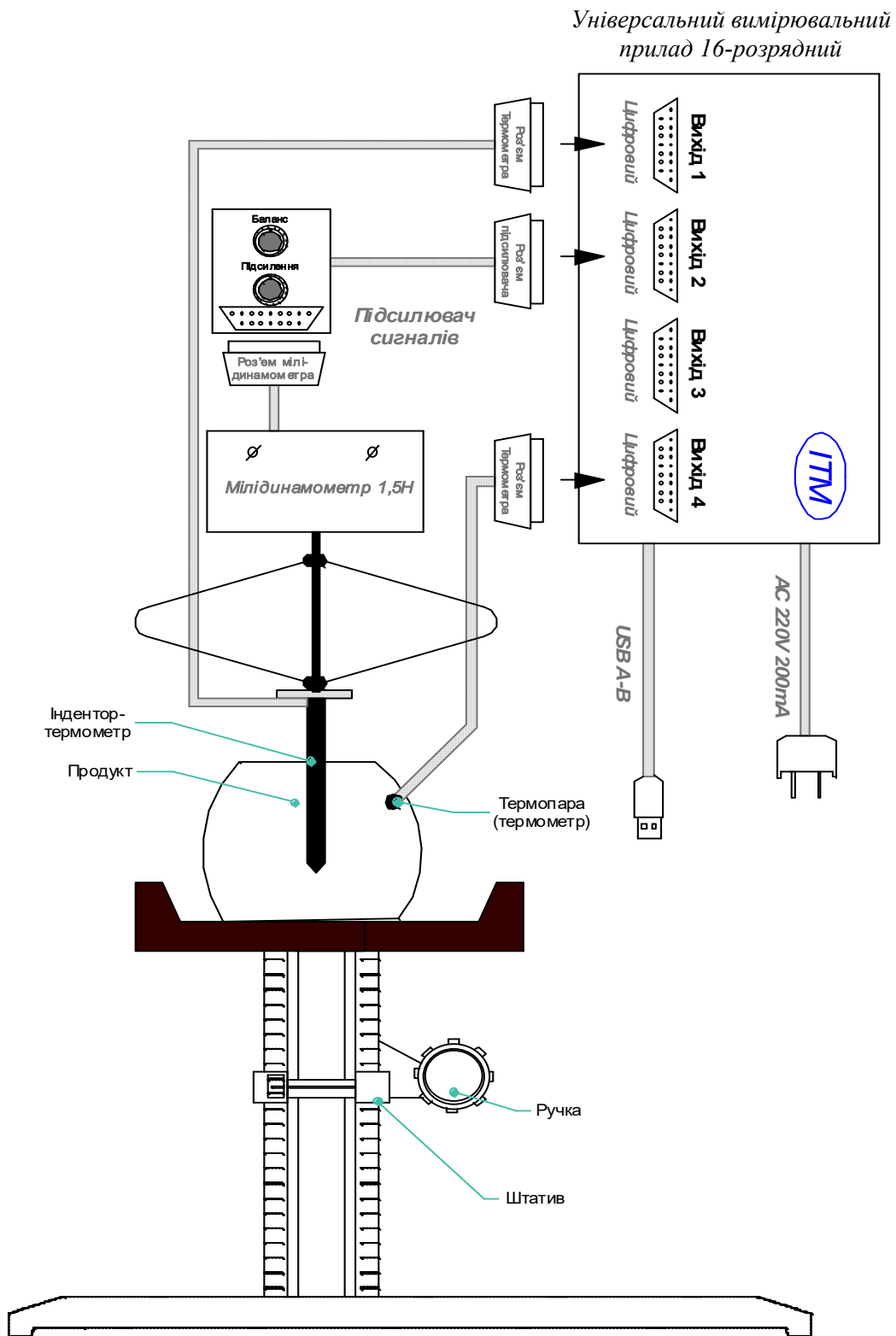


Рис. 2.15. Схема установки для визначення залежності структурно-механічних властивостей продуктів від температури

Термопара потрібна для визначення температури поверхневого шару. Температуру поверхневого шару можна також фіксувати лазерним пірометром, але при використанні універсального вимірювального комп'ютерного приладу показники всіх датчиків фіксуються автоматично, тому подальшу математико-статистичну обробку даних виконувати набагато зручніше.

Запропонований спосіб дозволяє визначати граничну напругу зсуву окремих фракцій продукту за рахунок математико-статистичної обробки не лише кінцевого результату (зусилля penetрації), а й побудови функції залежності зусилля penetрації від температури.

За результатами дослідження розроблено принципову схему установки для визначення залежності структурно-механічних властивостей від температури продукту, а також визначено залежність граничної напруги зсуву продукту від температури:

$$\theta_{od} = kf_i^{n+\frac{\beta \cdot t}{t_0}} + U, \quad (2.7)$$

де t – температура шару продукту;

t_0 – температура фазового переходу продукту в твердий стан;

β – коефіцієнт, що характеризує термічну залежність структурно-механічних властивостей продукту;

θ_{od} – гранична напруга зсуву термічно однорідного продукту;

k, n, U – коефіцієнти, що характеризують індивідуальні властивості досліджуваного продукту.

Для визначення граничної напруги зсуву, меж міцності та пружності харчових продуктів під час нагрівання або охолодження спроектовано спеціальну установку (рис. 2.16).

Розділ 2. Будова, комплектація та принцип роботи модуля «Реологія» приладу МІГ-1.3

Універсальний вимірювальний прилад 16-розрядний

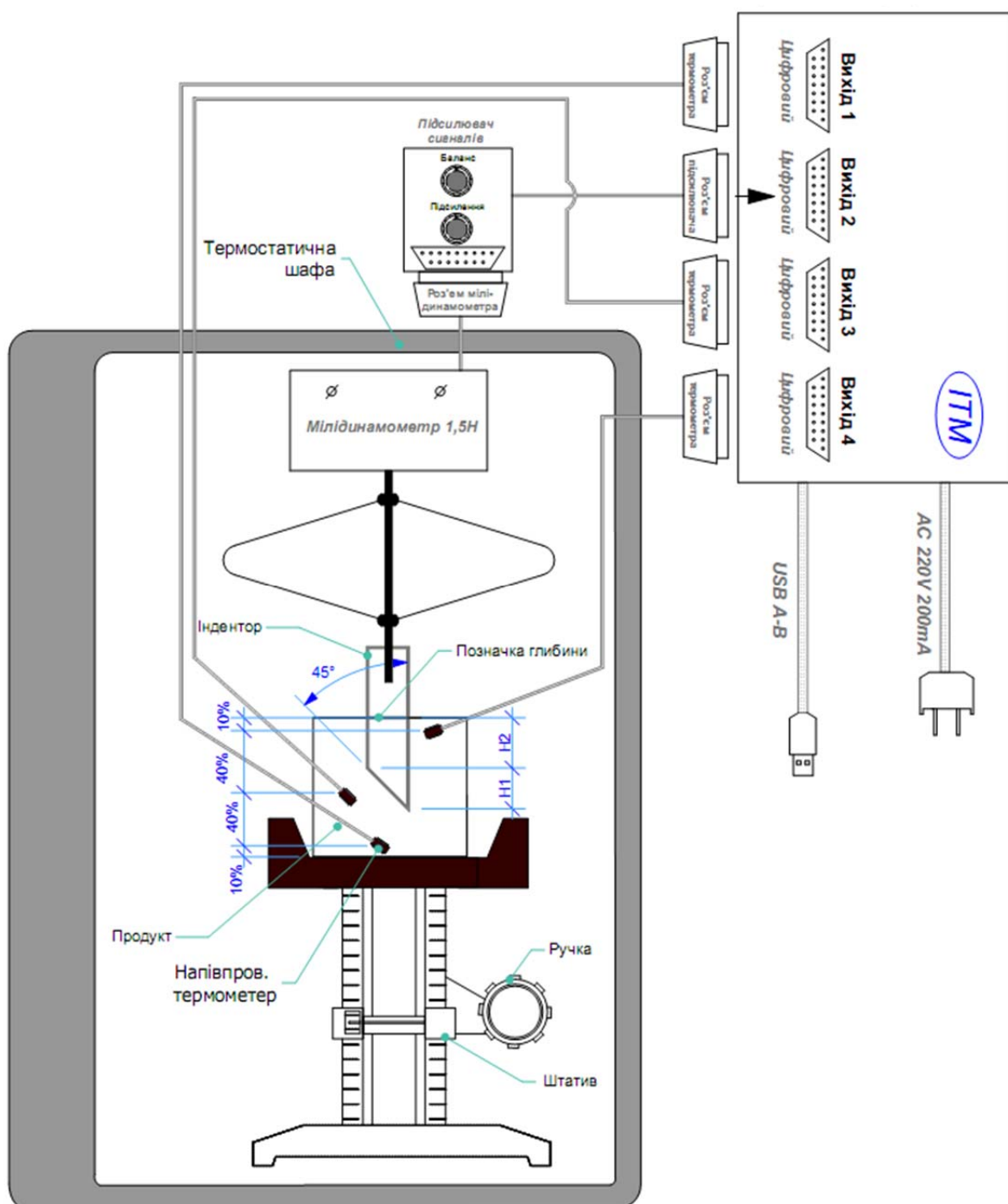


Рис. 2.16. Схема установки для визначення тиску всередині рідких харчових продуктів у процесі термічної обробки

Принцип роботи установки полягає у вимірюванні зусилля протидії переміщенню індентора. Індентор складається з двох плоско-паралельних пластинок, обрізаних під кутом 45° , шириною (b) 17,5 мм, товщиною (d) 0,3 мм та висотою (глибиною занурення) 15 мм. Відстань між пластинками – 7,4 мм. Пластини проникають в досліджуваний зразок. За максимальним значенням сили (F) при витягуванні пластинок визначаємо граничну напругу зсуву (ГНЗ) (θ). Швидкість зсуву визначаємо із аналізу графіків (0,002 м / час виймання зразка, с). Зовнішній вигляд установки наведено на рис. 2.17.



Рис. 2.17. Установка для визначення тиску всередині рідких харчових продуктів в процесі термічної обробки

Вимірювання сили здійснюється з допомогою динамометричного датчика з діапазоном вимірювань $0,001 \div 50\text{Н}$, ціна поділки динамометра – $0,000313\text{Н}$, абсолютна похибка окремого вимірювання – не більше $\pm 0,000014\text{Н}$. Період вимірювання – 50 мс. Дані вимірювань наводять у вигляді графіка у координатах «сила/час».

Приклад побудови отриманого графіка при визначенні граничної напруги зсуву наведено на рис. 2.18.

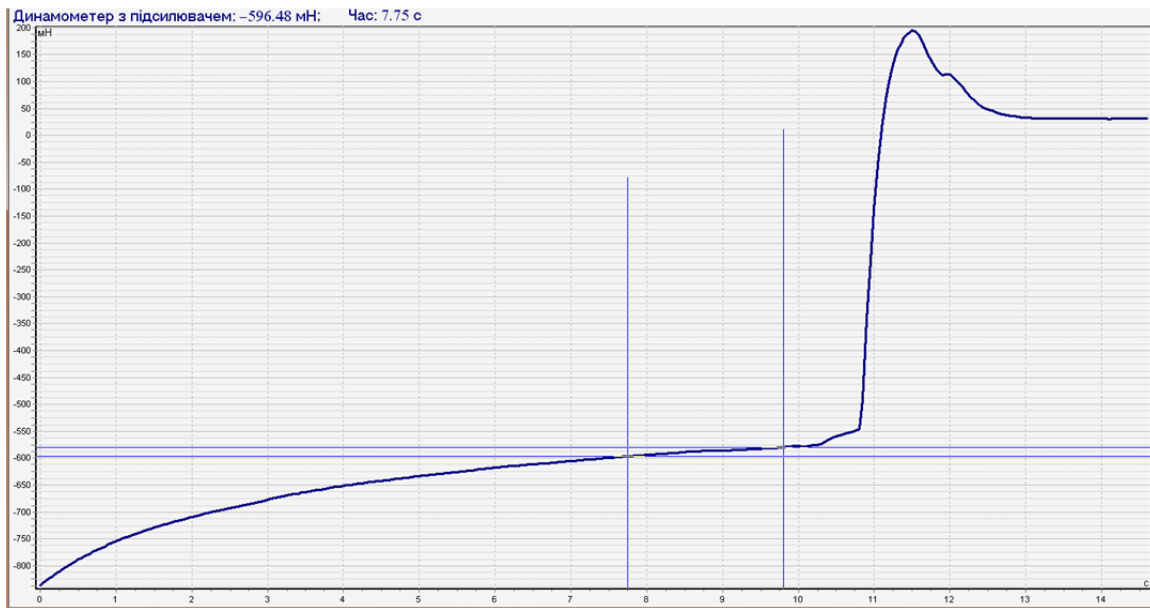


Рис. 2.18. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Приклад вимірювання граничної напруги зсуву зразка при 16 °С під час охолодження

Гранична напруга зсуву під час певної стадії швидкості зсуву визначається за формулою:

$$\theta_{ст} = \frac{F_{нік} - P_{доод}}{4bh}, \quad (2.8)$$

де $F_{нік}$ – пікове значення сили при винесенні індентора (плоско-паралельних пластинок), мН;

$P_{доод}$ – додаткове (некомпенсоване) значення ваги індентора, мН (вага індентора компенсується спеціальними налаштуваннями МІГ-1.3, проте занадто складно компенсувати вагу у межах ± 15 мН, крім того, на точне значення показника має суттєвий вплив вага залишків продукту на інденторі, що змінюється після кожного дослідження);

b – ширина пластинок (середнє значення), мм;

h – глибина заглиблення пластинок (середнє значення), мм.

Для створення високоякісних продуктів харчування необхідно цілеспрямовано впливати на їхні органолептичні властивості. У зв'язку з цим при розробці нових виробів їх консистенція повинна оцінюватися за сукупністю реологічних характеристик. Тому розробка кулінарної продукції потребує наукового обґрунтування доцільності внесення до рецептури виробів нових компонентів не тільки з позиції їх біологічної цінності, але й реологічних властивостей. Однією з основних характеристик реологічних властивостей продуктів харчування є гранична напруга зсуву.

Гранична напруга зсуву характеризує міцність просторової структури, що утворюється шляхом опору її дії зовнішніх сил, які призводять до руйнування структури. Для отримання зсувних характеристик виробів і оцінювання міцності їх структури нами було використано один з важливих показників якості – коефіцієнт граничної напруги зсуву θ_0 , що визначається за найбільшою напругою, при якій здійснювався зсув плоскопаралельних пластин.

Вимірювання сили здійснюється за допомогою динамометричного датчика з діапазоном вимірювань 0,001 ÷ 50Н (див. рис. 2.19), ціна поділки динамометра – 0,000313Н, абсолютна похибка окремого вимірювання – не більше $\pm 0,000014$ Н. Оптимальний період вимірювання – 20 мс. Дані вимірювань наводять у вигляді графіка у координатах «сила/час».

Приклад визначення граничної напруги зсуву на розробленій установці наведено на рис. 2.20.

Розділ 2. Будова, комплектація та принцип роботи модуля «Реологія» приладу МІГ-1.3

Універсальний вимірювальний прилад 16-розрядний

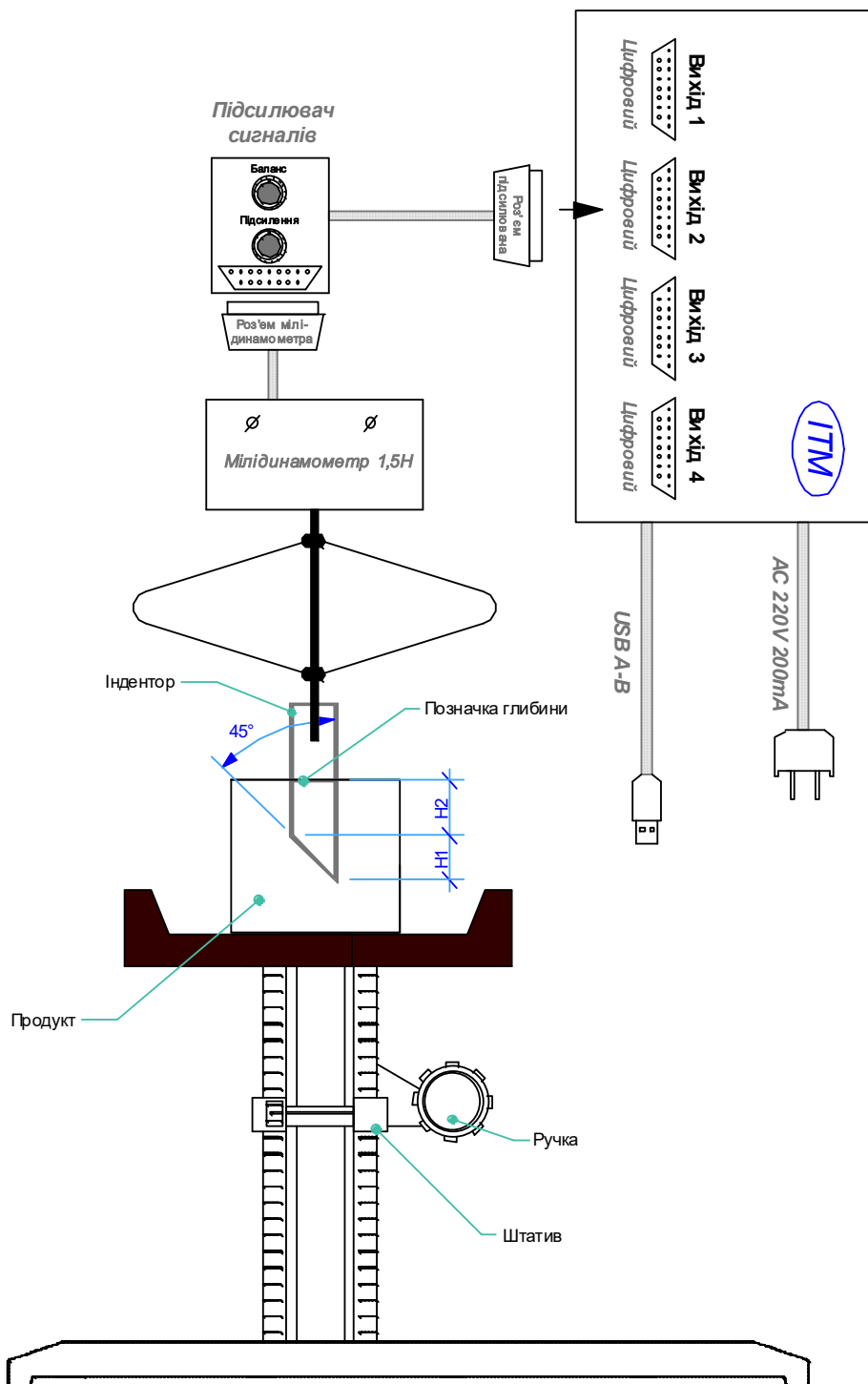


Рис. 2.19. Схема установки для визначення граничної напруги зсуву на 16-розрядному МІГ-1.3

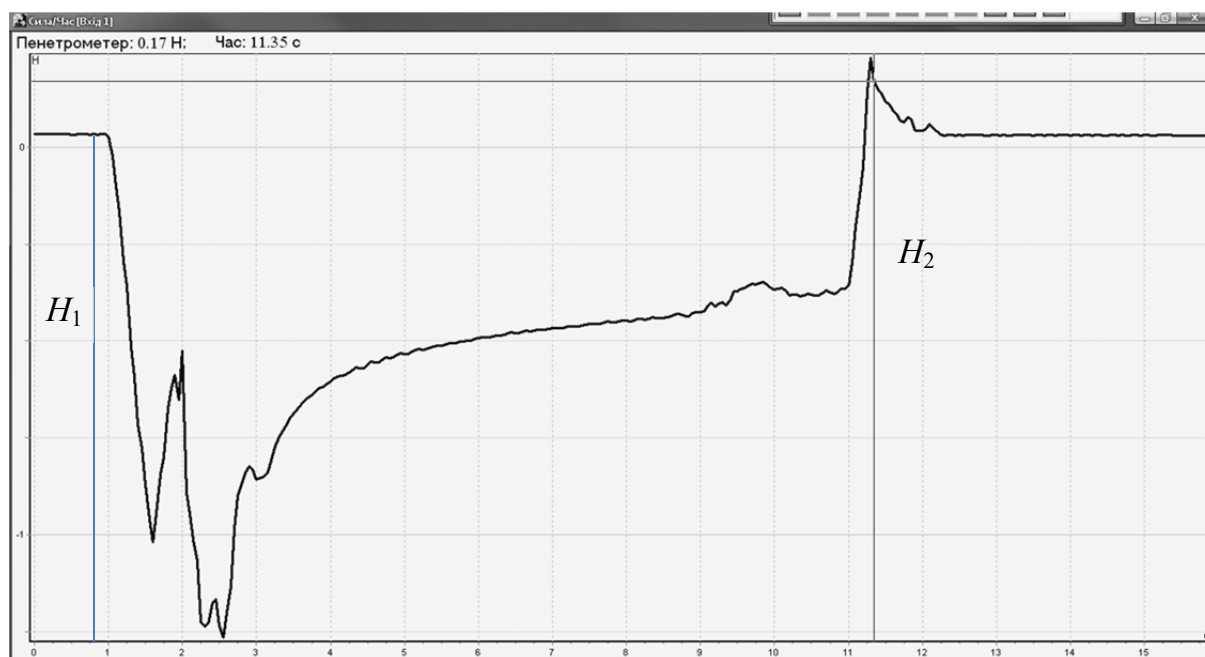


Рис. 2.20. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3».
Приклад визначення граничної напруги зсуву

Дослідження рекомендуємо проводити за постійної глибини penetрації (h) і визначати за формулою:

$$h = 0,5H_1 + H_2. \quad (2.9)$$

Величини H_2 та H_1 позначено на рис. 2.20.

Для обрахунку ГНЗ слід визначити максимальне зусилля (F), за якого індентор (плоска пластинка) виходить з продукту. Також необхідно виміряти ширину ножа (b). Розраховуємо коефіцієнт граничної напруги зсуву (θ_0), який характеризує консистенцію продукту:

$$\theta_0 = \frac{F}{2bh} \quad (2.10)$$

За методом penetрації під час аналізу ГНЗ можна визначити межу міцності продукту.

Оскільки абсолютна різниця між значеннями меж пружності та міцності досліджуваних виробів доходить до 800 Па, тому значення сили на одиницю площі доцільно позначити на логарифмічній шкалі.

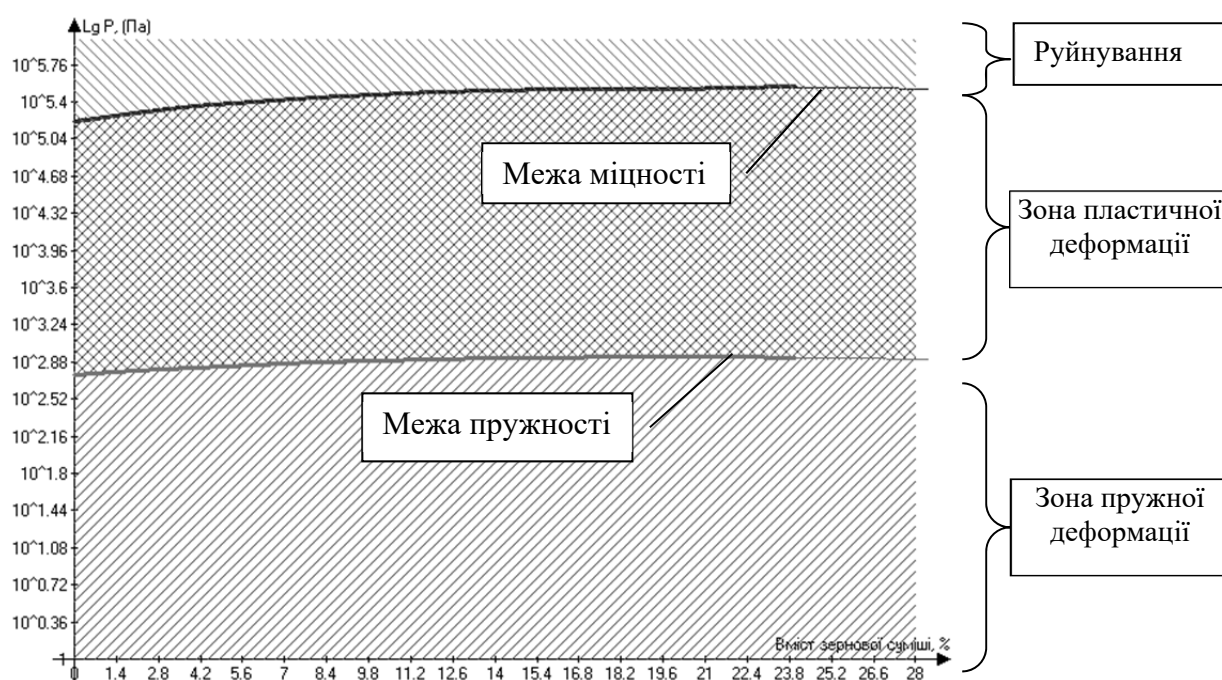


Рис. 2.21. Інтегрування рівнянь регресії, що описують залежність структурно-механічних властивостей продукту від вмісту зернової суміші

Оскільки гранична напруга зсуву характеризує мінімальне дотичне напруження, необхідне для здійснення зсуву, що є причиною незворотної деформації [44, 46], то гранична напруга зсуву є функцією межі пружності:

$$\sigma = f(y_{\text{п}}). \quad (2.11)$$

Отже, проаналізувавши отримані рівності, можна стверджувати, який із зразків є більш пластичним, або пружним.

2.6. Визначення абсолютної та кінематичної в'язкості

Розмірність кінематичної в'язкості – сантистокс (cSt). Одиниця кінематичної в'язкості в системі СІ – $\text{мм}^2 / \text{с}$, що дорівнює 1 cSt.

Для характеристики рідких продуктів харчування частіше використовують термін «абсолютна в'язкість», або «динамічна в'язкість», яка є добутком кінематичної в'язкості та густини рідини:

$$\delta_{\delta} = \nu \cdot \rho, \quad (2.12)$$

де δ_{δ} – абсолютна (динамічна) в'язкість;

ν – кінематична в'язкість;

ρ – густина продукту.

Абсолютна в'язкість вимірюється в сантипуазах (спуаз). У системі СІ абсолютна в'язкість вимірюється в міліпаскаль-секундах (мПа·с), де 1 спуаз = 1 мПа·с.

В'язкість також може вимірюватися в несистемній одиниці – градусах Енглера. Кількість градусів Енглера визначається відношенням часу витікання (в секундах) 200 см^3 випробуваної рідини при даній температурі з віскозиметра типу ВУ (Енглера) до часу витікання (в секундах) 200 см^3 дистильованої води з того ж приладу при нормальній температурі (20 °С). Переведення градусів Енглера в одиниці кінематичної в'язкості виконують за формулою:

$$\nu = 0,073^0 E - \frac{0,063}{^0 E}, \quad (2.13)$$

де E – в'язкість у градусах Енглера;

ν – кінематична в'язкість ($\text{мм}^2/\text{с}$).

Прототипом розробленого методу є метод визначення умовної в'язкості [57], за допомогою якого визначають час витікання продукту через капілярний віскозиметр певного діаметра. Недоліком цього методу є складність, а інколи і неможливість визначення в'язкості тиксотропних продуктів та певних фракцій зразка.

Запропонований метод відрізняється від прототипу тим, що, по-перше, використовують віскозиметр оригінальної конструкції, який складається із двох послідовно з'єднаних циліндрів, що дозволяє визначити не лише швидкість проходження рідини через циліндр (кількісний показник в'язкості), а й поведінку завислих у рідині твердих частинок при різкому звуженні діаметра (збільшення швидкості продукту). Це надає змогу мінімізувати вплив осаду на значення в'язкості продукту. По-друге, цей метод дозволяє визначати в'язкість окремих фракцій продукту за рахунок математико-статистичної обробки не лише кінцевого результату (часу витікання), а і побудови функції зменшення ваги віскозиметра за часом.

В основу винаходу покладено завдання удосконалити методику визначення в'язкості тиксотропних харчових продуктів. Ця мета досягається за рахунок удосконалення методики визначення динаміки швидкості витікання продукту через віскозиметр спеціальної форми із вертикальним капіляром.

Кінематична в'язкість – міра потоку, що характеризує опір рідини під впливом сили тяжіння. Коли дві рідини рівного об'єму поміщені в ідентичні капілярні віскозиметри і рухаються самопливом, більш в'язкій рідині потрібно більше часу для протікання через отвір. Якщо одній рідині потрібно для витікання t секунд, а інший – kt , тоді друга рідина має в k разів більшу в'язкість за шкалою кінематичної в'язкості, ніж перша. Отже, коли відоме табличне значення кінематичної в'язкості еталонної рідини (наприклад, дистильованої води при температурі $18\text{ }^{\circ}\text{C}$) та швидкість витікання обох рідин із однакових віскозиметрів, можна визначити кінематичну в'язкість досліджуваної рідини.

Зразок заливають до віскозиметра, що складається із двох послідовно з'єднаних циліндрів, розташованих на одній осі так, щоб циліндр більшого діаметра був розташований вище. Віскозиметр закріплюють на динамометрі або терезах. Співвідношення між діаметрами циліндрів повинно бути від 1:2 до 1:5 залежно від розмірів твердих частинок у зразку. Співвідношення між довжинами циліндрів повинно бути від 1:1 до 1:0,2.

Залежно від мети дослідження перед вимірюванням дозволяється дочекатися утворення осаду.

Далі слід відкрити вихідний отвір віскозиметра та зафіксувати вагу віскозиметра кожні 0,05...0,1 с. Після того, як значення ваги віскозиметра не змінюється протягом 3...5 хв, вимірювання зупиняють. Отримані значення аналізують за допомогою програмного забезпечення, похідна отриманої функції описуватиме динаміку зміни швидкості витікання тиксотропного харчового продукту через віскозиметр. Під час аналізу функції відсікаються всі стрибкоподібні зміни ваги, які суттєво випадають із рівняння функції зміни ваги за часом.

Під час вимірювання фіксують значення температури продукту у віскозиметрі та продукту, що витік через його отвір. Середня температура вважається температурою експерименту. Дослідження можна проводити за довільного значення температури (залежно від властивостей продукту), проте різниця температур продукту та зовнішнього середовища не повинна перевищувати 15 °С.

Розрахунок виконується на основі спеціально розробленої математичної моделі у вигляді диференціального рівняння витікання рідини:

$$\mu_{ef} \frac{d^2 P}{dt^2} \cdot \frac{d_1}{d_2} + \mu_{ef} \frac{dP}{dt} \cdot \frac{l_2}{l_1} + \frac{r_{3M} \pi d_2^2}{4} dx = P, \quad (2.14)$$

- де P – вага рідини у віскозиметрі;
 $r_{зм}$ – коефіцієнт змочування продуктом матеріалу віскозиметра;
 μ_{ef} – кінематична в'язкість при сталій швидкості, Па·с;
 $F_{ад}$ – міцність адгезії, Па;
 d_1 та d_2 – внутрішні діаметри більшого та меншого циліндрів віскозиметра відповідно, м;
 l_1 та l_2 – довжини більшого та меншого циліндрів віскозиметра відповідно, м.

Кінематичну в'язкість продукту визначають за формулою:

$$\nu = K \nu_{роз} \left(\frac{\pi d_1 t_{зр}}{2 l_1 t_{роз}} - \frac{\pi d_2 t_{зр}}{4 l_2 t_{роз}} \right), \quad (2.15)$$

- де $t_{зр}$ – час повного витікання зразка через віскозиметр, с;
 $t_{роз}$ – час повного витікання калібрувальної рідини (частіше розчинника) через віскозиметр, с;
 $\nu_{роз}$ – кінематична в'язкість розчинника, мм²/с;
 ν – кінематична в'язкість, мм²/с;
 K – коефіцієнт віскозиметра, що визначається залежно від геометричної форми переходу з більшого циліндра до меншого, для сферичного переходу – $K = \frac{2R}{d_1 - d_2}$,
для плоского переходу – $K = \cos \varphi_p$;
 R – радіус перерізу переходу між циліндрами;
 φ_p – кут площини переходу між циліндрами до стінок циліндра більшого діаметра.

Для характеристики рідких продуктів харчування частіше використовують термін «абсолютна в'язкість». Переведення кінематичної в'язкості в абсолютну, або динамічну проводять за формулою:

$$\delta_{\delta} = \nu \cdot \rho, \quad (2.16)$$

де δ_{δ} – абсолютна (динамічна) в'язкість;
 ρ – густина продукту.

Схему установки для визначення відносної в'язкості наведено на рис. 2.22.

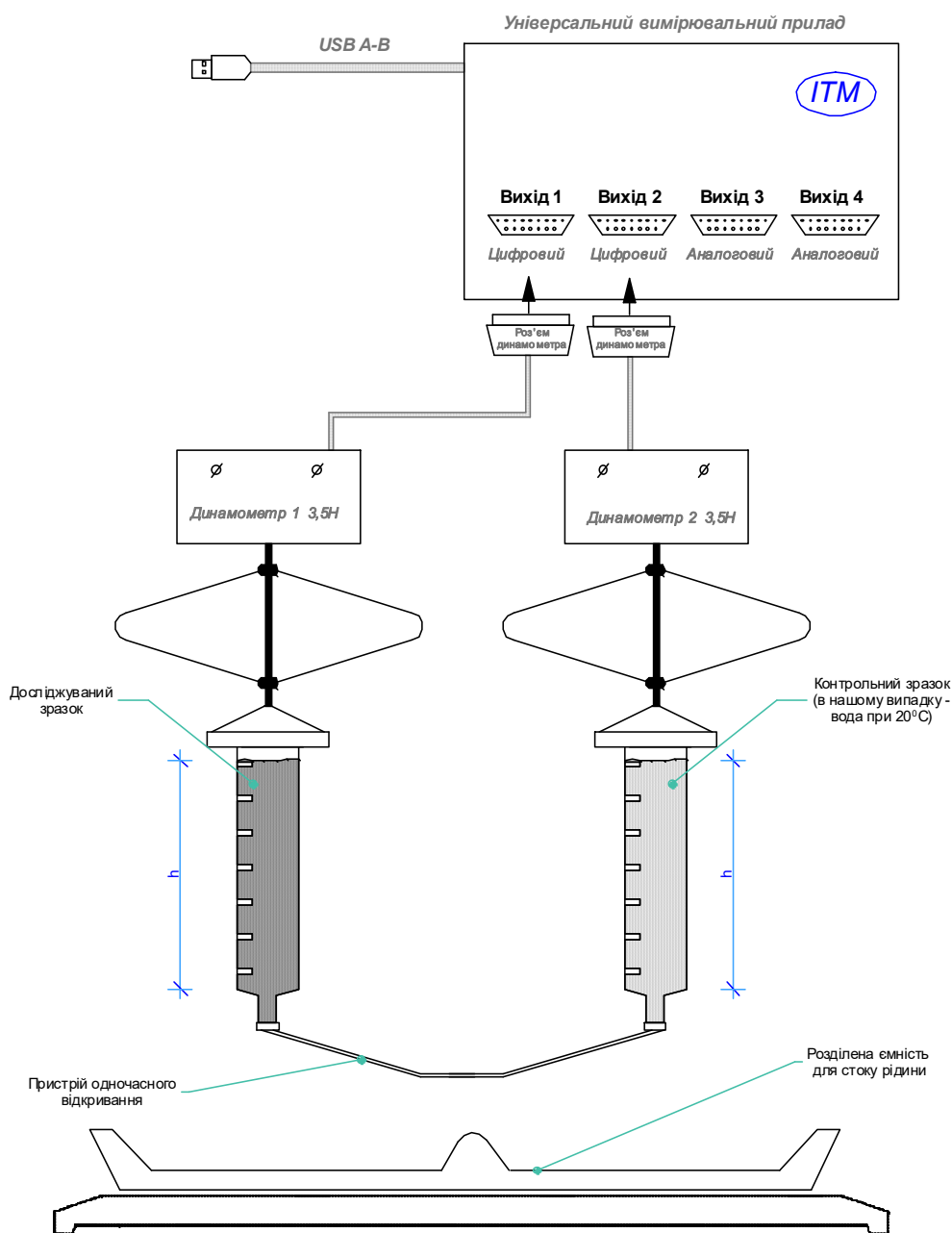


Рис. 2.22. Модуль «Реологія» приладу МІГ-1.3. Схема установки для визначення відносної в'язкості

Переведення кінематичної в'язкості в градуси Енглера здійснюють за відповідними таблицями.

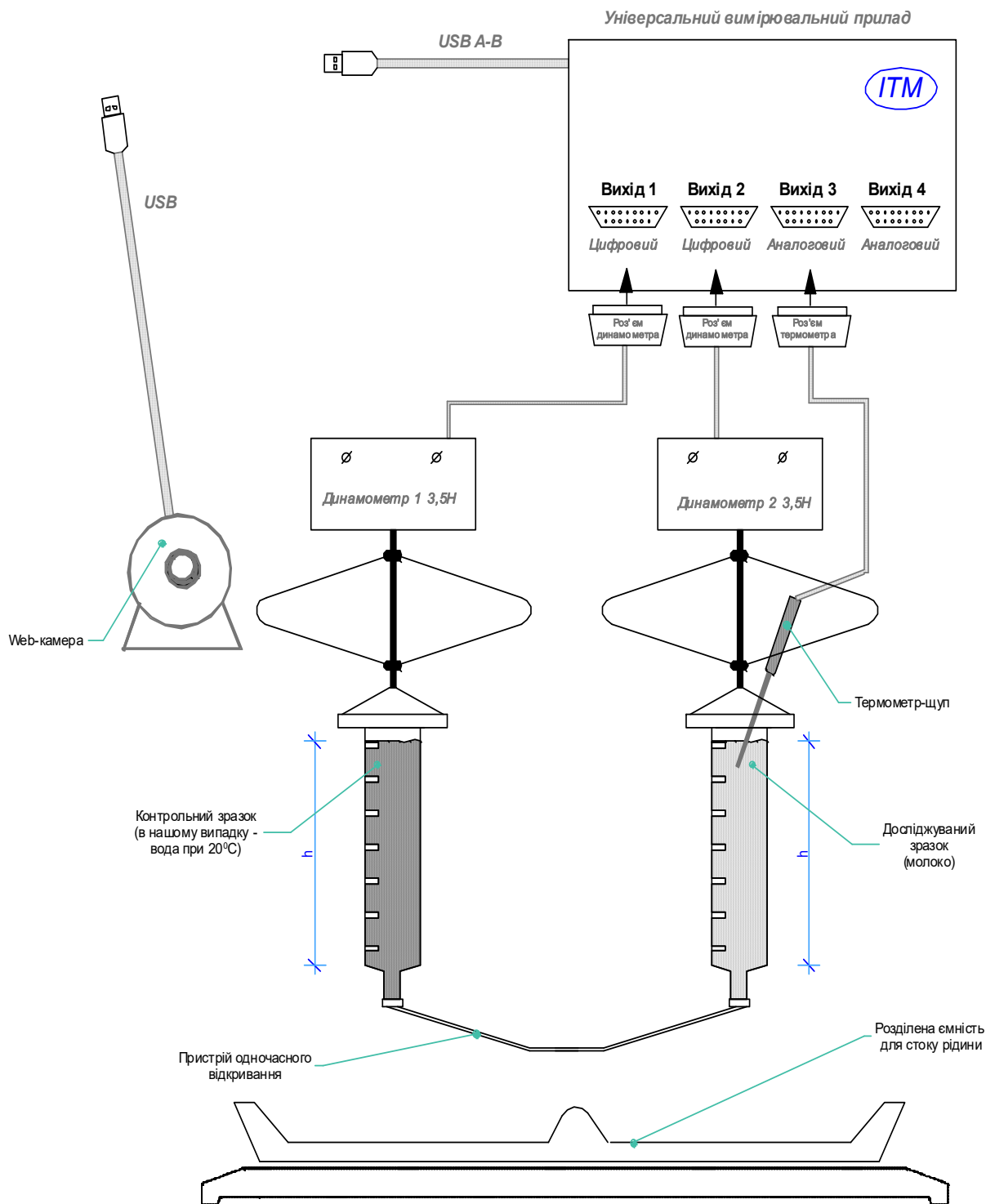


Рис. 2.23. Модуль «Реологія» приладу МІГ-1.3. Схема установки для визначення динаміки в'язкості рідин

Запропонований спосіб визначення в'язкості тиксотропних харчових продуктів сприяє удосконаленню методів комплексного оцінювання в'язкості сировини, напівфабрикатів та готових виробів у кореляційній залежності від показника зміни швидкості витікання через віскозиметр оригінальної конструкції та структурно-механічних і технологічних властивостей продукту.

Використання МІГ-1.3 надає змогу легко визначити в'язкість непрозорих рідин.

Дослідження динамічної в'язкості виконують за таким алгоритмом:

1. Зразок досліджуваної рідини та 300 мл дистильованої води 20–30 хв перебувають у приміщенні в закритому посуді для того, щоб вони набули однакової температури. Після вирівнювання температури рідини ретельно перемішують та перевіряють температуру термопарою (можна використовувати термометр з комплекту МІГ-1.3). Якщо метою дослідження є визначення в'язкості продукту при певній температурі, то продукт, попередньо нагрівши/охолодивши, залишають при кімнатній температурі у віскозиметрі із електронним термометром всередині.

2. Досліджувану рідину та дистильовану воду наливають до віскозиметра. Рівень рідин бажано вирівняти, проте значення об'єму/маси рідини можна легко скоригувати при обробці масиву даних.

3. До пробок віскозиметра приєднують пристрій для одночасного відкривання¹.

4. Запускають початок вимірювань на панелі управління експериментом програми «Лабораторія МІГ-1.3».

5. У меню за необхідності слід вибрати пункт «Налаштування», а в ньому вкладку «Зовнішній пуск».

¹ За відсутності пристрою для одночасного відкривання одного віскозиметра чи динамометра досліди для води та досліджуваної рідини можна проводити по чергово.

6. У вкладці «Зовнішній пуск» вибрати вхід, до якого підключено динамометр з віскозиметром, заповненим дистильованою водою. В пункті «значення» виставити значення показників динамометра, яке значно перевищуватиме вагу води з віскозиметром (наприклад, при вимірюванні швидкості витікання 200 мл води значення зовнішнього пуску доцільно встановлювати 3–3,2 Н).

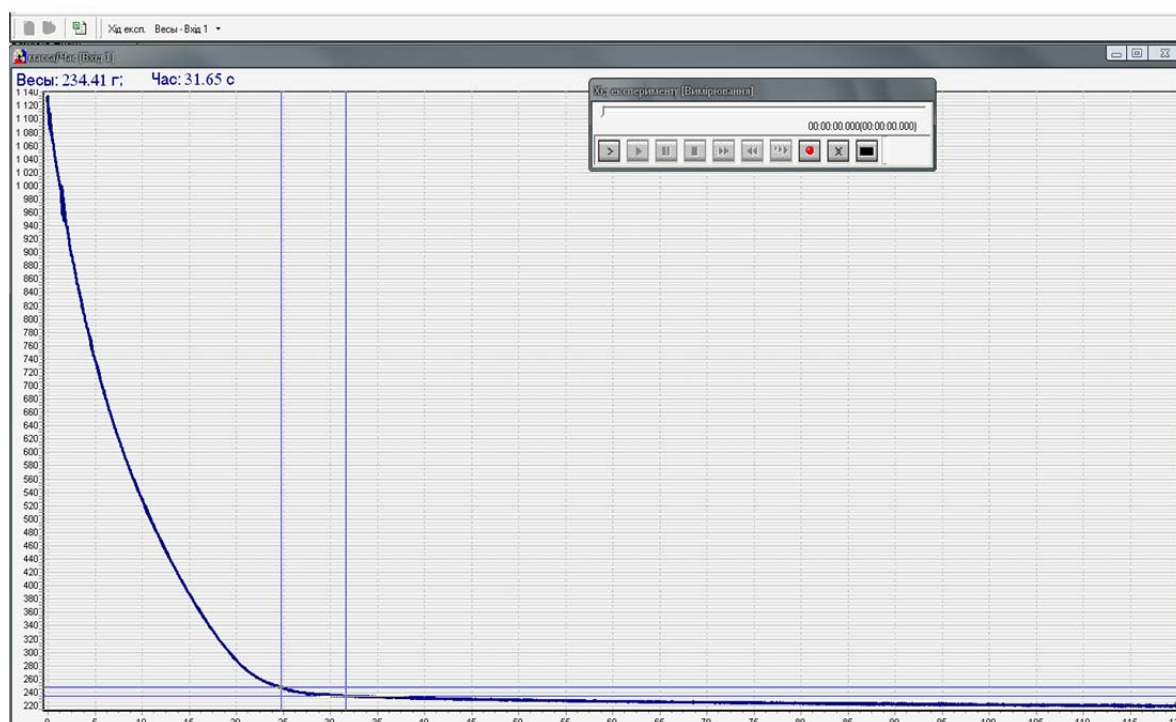
7. Запускають початок вимірювань на панелі управління експериментом програми «Лабораторія МІГ-1.3», перевіряють роботу функції «Зовнішній пуск», потягнувши за кріплення віскозиметра з водою із зусиллям $\approx 5\text{Н}$ (0,5 кгс), якщо функція «Зовнішній пуск» налаштована правильно, то процес вимірювання розпочнеться.

8. Після випробування віскозиметри заповнюють дистильованою водою та досліджуваним продуктом. Якщо метою дослідження є визначення в'язкості продукту при певній температурі, то до віскозиметра з продуктом опускають електронний термометр та вмикають його на третій або четвертий входи МІГ-1.3.

9. Вмикають вимірювання та одночасно запускають витікання рідин, відкривши пристрій для одночасного відкривання. Після того, як значення інтенсивності послабленого випромінювання ($I_{\text{посл}}$) не змінюється протягом 30 с, вимірювання зупиняють.

10. Графіки зменшення ваги за часом копіюють клавішею «Print Screen» та одночасно імпортують до MS Excel (кнопка «Експорт у Excel» у вікні програми «Лабораторія МІГ-1.3»). Приклади графіків динаміки зменшення ваги за часом при витіканні водоемульсійних фарб із циліндра об'ємом 0,35 л через отвір діаметром 3 мм наведено на рис. 2.24.

11. Отримані значення аналізують за допомогою програмного забезпечення, побудована функція описуватиме динаміку седиментації дисперсної системи.



*Рис. 2.24. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3».
Динаміка витікання водоемульсійної фарби*

Отже, у розділі 2 розкрито теоретико-методологічні основи використання модуля «Реологія» для наукових досліджень щодо комплексного вивчення структурно-механічних властивостей різнофазних досліджуваних систем. Наведено ґрунтовний опис роботи модуля «Реологія» та схеми будови окремих пристроїв.

Крім того, визначено основні напрями комплексних досліджень структурно-механічних властивостей сировини та матеріалів як в рідкому, так і в пружно-пластичному стані.

Розроблений комплекс дозволяє інтерпретувати отримані результати досліджень на молекулярному та енергетичному рівнях, що є значною перевагою в наукових дослідженнях з реології, особливо стосовно харчової сировини та матеріалів.

Розділ 3

БУДОВА, КОМПЛЕКТАЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДУЛЯ «ПОВЕРХНЯ» ПРИЛАДУ МІГ-1.3

3.1. Визначення адгезії

На сьогодні одним із пріоритетних напрямів дослідження матеріалів є вивчення фізичних властивостей їхніх поверхонь. За останнє десятиріччя на дослідження властивостей поверхні витрачено коштів більше, ніж на ядерні дослідження [61] і це не дивно, адже споживчі властивості всіх тіл, у тому числі харчових продуктів, безпосередньо залежать від фізичних властивостей їхньої поверхні.

Показником, що визначає технологічні параметри виготовлення, порціонування та пакування харчових продуктів, є адгезія.

Визначити рівноважну роботу адгезії між продуктом і твердим тілом здебільшого занадто складно через дуже високу в'язкість переважної кількості продуктів. Тому стосовно більшості продуктів визначають не адгезію, а адгезійну міцність, що вимірюється як питома робота або питома сила руйнування зв'язку між адгезивом і субстратом [62].

Однак при механічному руйнуванні адгезійного з'єднання робота, що витрачається на відшаровування двох тіл, йде не тільки на подолання адгезії, а й на інші побічні процеси (деформація тіла, подолання сил механічних зачеплень тощо). Тому не тільки величини, а й поняття адгезії й адгезійної міцності не тотожні, їх потрібно чітко розмежовувати [63].

Для вимірювання адгезії методами нормального відриву користуються плоскими пластинами грибкового типу, між торцевими поверхнями яких розміщений адгезив. Схему установки для визначення адгезії при нормальному відриві наведено на рис. 3.1.

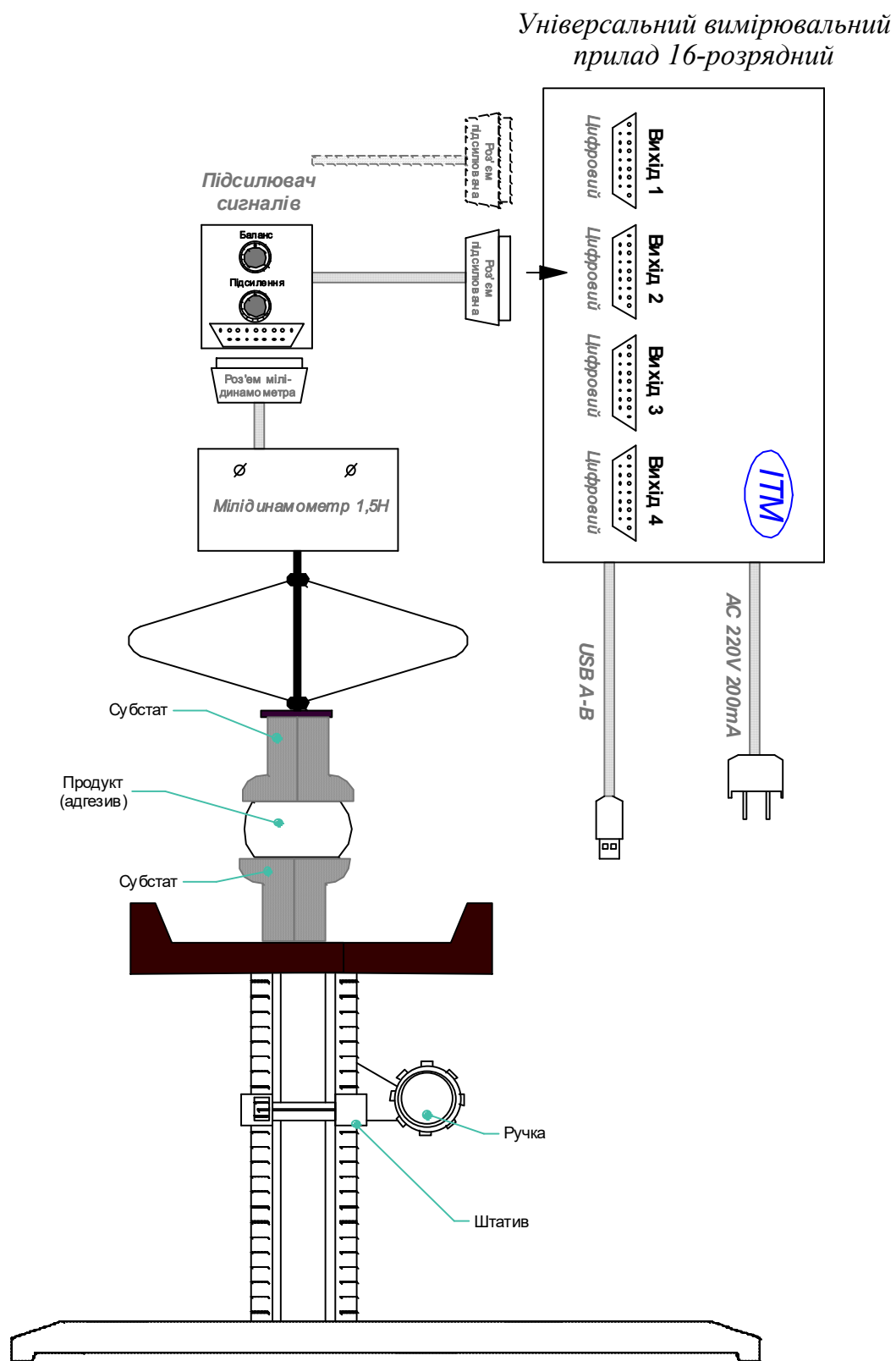


Рис. 3.1. Прилад МІГ-1.3. Схема установки для визначення адгезії при нормальному відриві

Вимірювання сили здійснюється з допомогою динамометричного датчика з діапазоном вимірювань 0,001 ÷ 50Н, ціна поділки динамометра – 0,000313Н. Період вимірювання – 0,05 с. Дані вимірювань наводять у вигляді графіка у координатах «сила/час».

Адгезію визначали на МІГ-1.3 за методом нормального відриву [64]. На горизонтальний зріз продукту опускали динамометр з нерухомо закріпленим диском із нержавіючої сталі без отворів. Диск вдавлюється в продукт на 0,5–1,0 мм, при цьому значення сили лежать поза межею вимірювання динамометра.

Після 2–3 с вдавлювання динамометр з диском повільно піднімали та фіксували значення сили кожні 0,05 с.

Максимальне значення сили, поділене на площу контакту адгезива із субстратом, дорівнюватиме адгезії продукту, яку визначали за формулою:

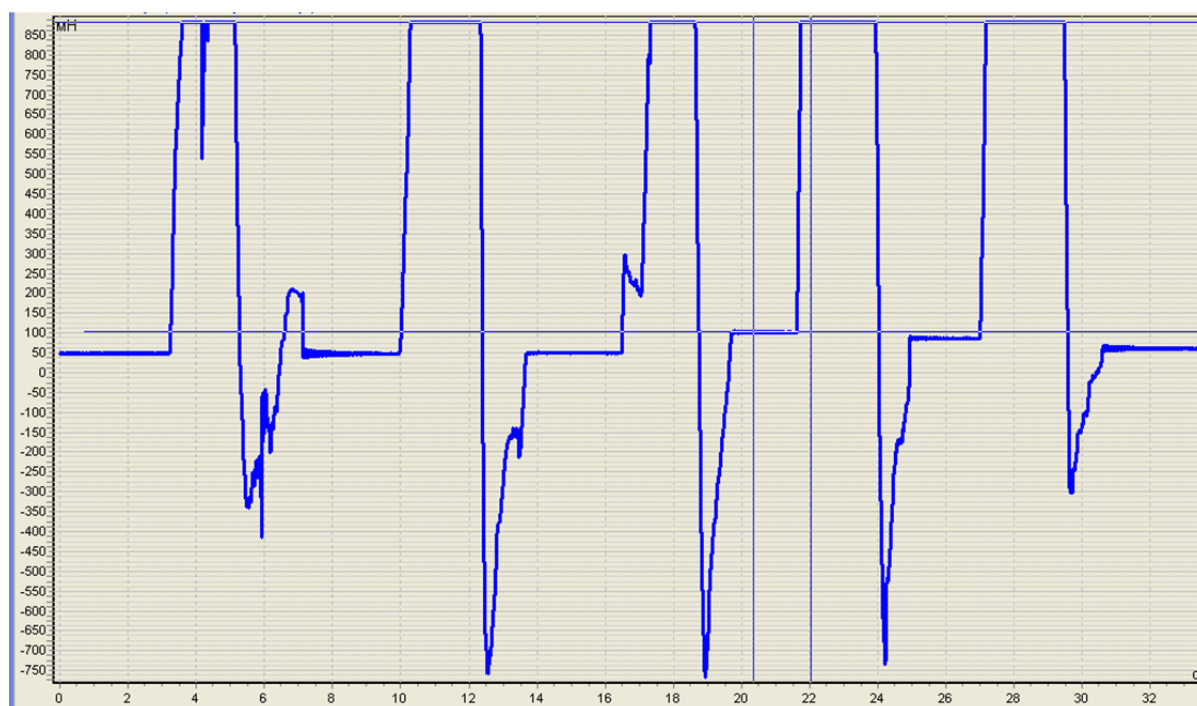
$$\omega_a = -\frac{4(F_{ад} - P_{дод})}{\pi d^2}, \quad (3.1)$$

де $F_{ад}$ – пікове значення сили при відриві диска, мН;

d – діаметр диска (20,8 мм).

Приклад побудови графіка результатів визначення адгезії наведено на рис. 3.2.

Особливістю визначення показника адгезії продуктів є його залежність від часу контакту адгезиву та субстрату. Оскільки в експерименті вже присутній один фактор (час контакту), то при визначенні оптимальної кількості добавок (другий фактор) залежність адгезії продукту може бути описана лише тривимірним рівнянням [65].



*Рис. 3.2. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3».
Процес визначення адгезії продукту*

3.2. Визначення кінетичного коефіцієнта тертя

Для визначення статичного й кінетичного коефіцієнтів тертя сировини та матеріалів використовують промислові прилади, що складаються з таких компонентів: двигуна з підставкою, компенсаційних пружин, електронного динамометра і контролюючого мікропроцесорного блоку. При з'єднанні із самозаписним пристроєм реєструється точне значення тертя впродовж усього експерименту. Значним недоліком промислових приладів є висока ціна та неможливість визначення температурної залежності. Реальною альтернативою дорогому імпортному устаткуванню є модуль «Поверхня» приладу МІГ-1.3, який укомплектовано високочутливим оптичним цифровим динамометром (ціна поділки – 0,002 Н), частота вимірювань може сягати $10\,000\text{ с}^{-1}$, що дозволяє фіксувати найменші відхилення значень сили [4].

Таким чином, мета дослідження – розроблення методу визначення температурної залежності коефіцієнта тертя.

Головним етапом розробки методу визначення термічної залежності коефіцієнта тертя було збирання установки, калібрування датчиків та апробація методу. Оскільки поверхня ковзання в розробленій установці виготовлена з нержавіючої сталі, то всі коефіцієнти тертя на цьому етапі роботи над установкою визначаються відповідно до пари тіл «досліджуваний зразок – сталь».

На першій стадії розробки за допомогою програмних засобів тривимірної візуалізації (зокрема, програми AutoCAD 2007) створено віртуальну модель установки для визначення коефіцієнта тертя (рис. 3.3).

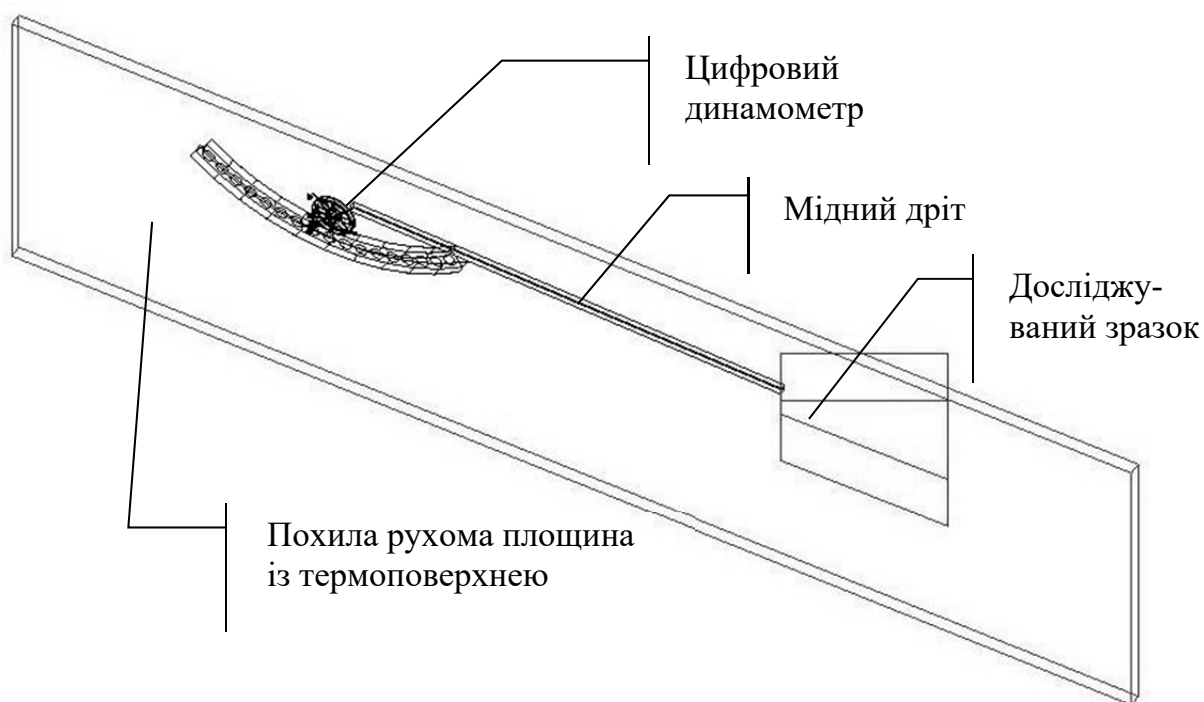


Рис. 3.3. Модель установки для визначення коефіцієнта тертя

Другий етап – визначення напрямів векторів основних сил, що діють на зразок матеріалу під час руху (рис. 3.4), та формулювання робочої формули.

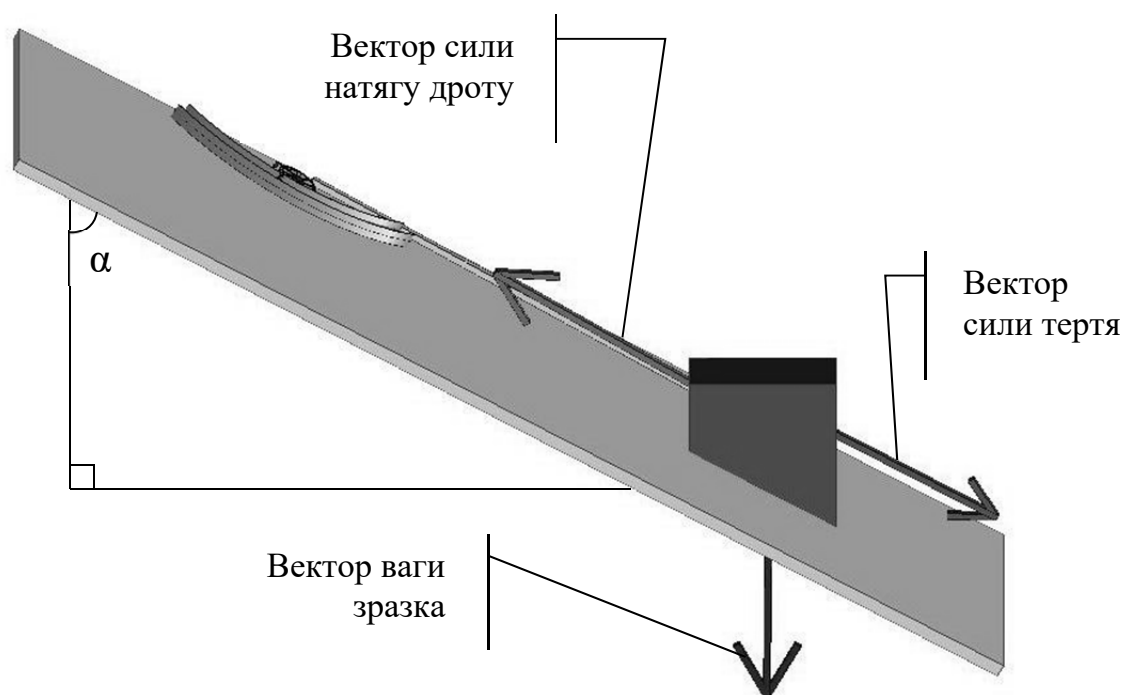


Рис. 3.4. Вектори сил, що діють на тіло під час руху по похилій площині

Під час руху по горизонтальній поверхні сила нормального тиску, як правило, дорівнює вазі тіла й може збігатися із силою тяжіння. Упродовж руху по похилій площині необхідно розкласти вагу на складові: силу, паралельну похилій площині, й перпендикулярну їй. Перпендикулярна складова ваги забезпечує силу нормального тиску, а отже, і силу тертя ковзання. Величина сили тертя обчислюється за формулою:

$$F = F_w - P \cdot \cos \alpha , \quad (3.2)$$

де F – сила тертя ковзання чи кочення;

F_w – сила взаємодії зразка та динамометра (Н);

P – вага зразка (Н);

α – кут відхилення похилої рухомої площини від перпендикуляра.

Основною характеристикою тертя є коефіцієнт тертя (μ), що визначається за природою поверхні матеріалів, з яких виготовлені взаємодіючі тіла: сила тертя (F) і нормальне навантаження (N_{nor}) у стані спокою зв'язані нерівністю:

$$|F| \leq \mu \cdot N_{nor} . \quad (3.3)$$

Під час відносного руху це співвідношення перетворюється у закон Амонтона–Кулона:

$$|F| = \mu \cdot N_{nor} . \quad (3.4)$$

Для більшості пар матеріалів значення коефіцієнта тертя (μ) не перевищує 1 і знаходиться в діапазоні 0,1–0,5. Якщо коефіцієнт тертя перевищує 1 ($\mu > 1$), це означає, що між контактуючими тілами є сила адгезії (F_{adh}) і формула розрахунку коефіцієнта тертя матиме вигляд [66]:

$$\mu = \frac{F}{N_{nor} + F_{adh}} . \quad (3.5)$$

Слід зазначити, якщо $\mu \geq 2$, багатокомпонентні тіла можуть переходити у рідкий стан. Для сичужного сиру це означає утворення шару розплавленого продукту між поверхнею приладу та зразком. При виникненні такого явища сили тертя будуть визначатися в'язкісними характеристиками розплавленого продукту, тому при $\mu \geq 2$ не можна визначити лише силу тертя та адгезію, оскільки силу опору руху продукту по площині буде створювати складний комплекс в'язкісно-реологічних характеристик аморфного (в більшості випадків) тіла.

Наступний етап розробки методу визначення коефіцієнта тертя – створення принципової схеми установки для визначення температурної залежності коефіцієнта тертя (рис. 3.5).

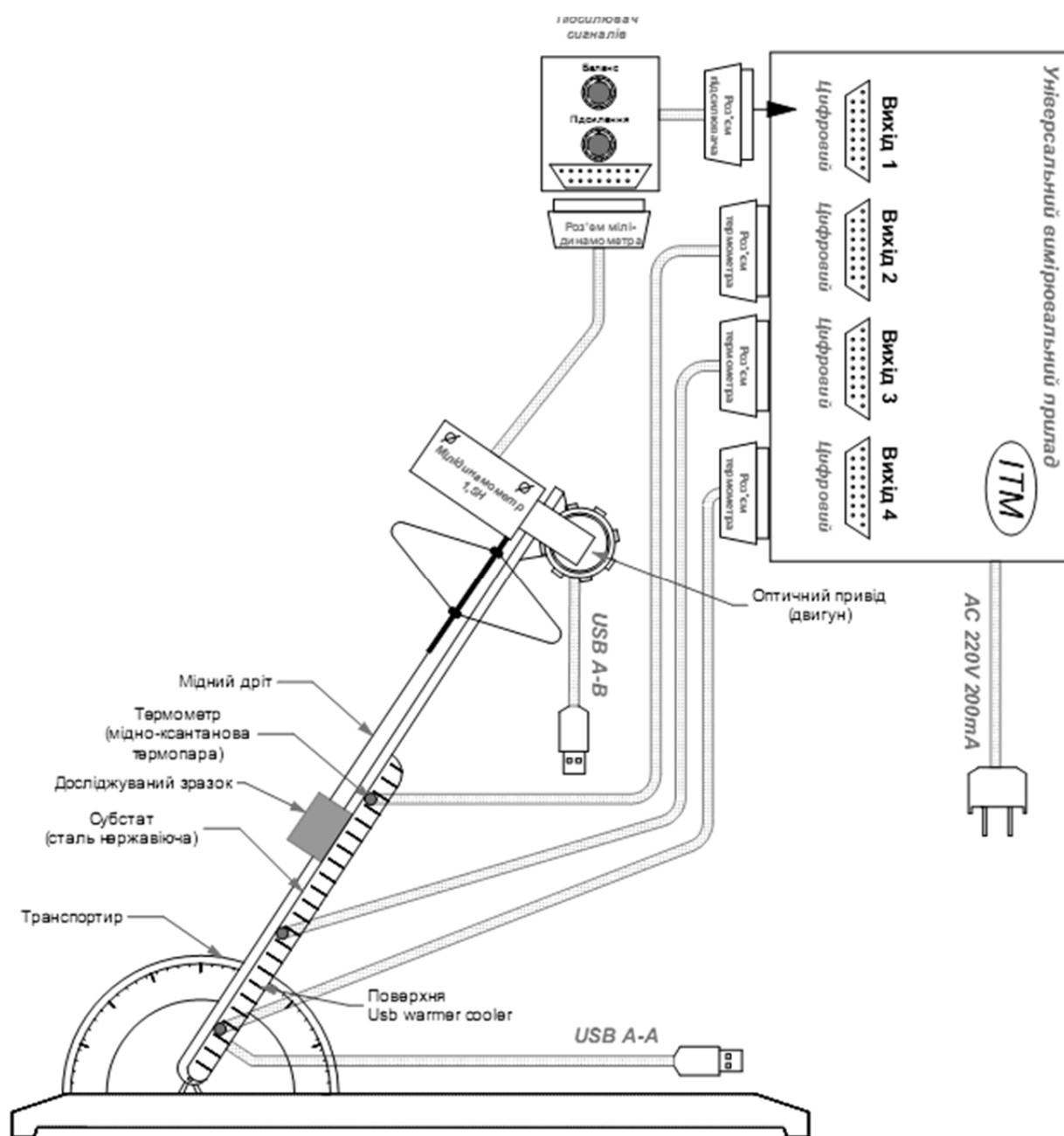


Рис. 3.5. Схема установки для визначення температурної залежності коефіцієнта тертя

Для створення поверхні з регульованою температурою використано підставку «Usb warmer cooler» з функціями нагрівання та охолодження, яка має термоповерхню із нержавіючої харчової сталі. Площа круглої поверхні підставки становить

лише $17,28 \text{ см}^2$, тому для визначення коефіцієнта тертя досліджуваній зразок повинен переміщатися на відстань до 5 см. Оскільки сила тертя залежить від швидкості руху, то з метою стабілізації швидкості зразка використано оптичний привід CD-RW компанії Samsung із швидкістю поступального руху лотка 3,2 м/с. Додатковою перевагою використання як двигуна комп'ютерного оптичного приводу є управління цим процесом безпосередньо з операційної системи без розробки додаткового програмного забезпечення.

Оскільки «Usb warmer cooler» не має вбудованих термометрів, то під термоповерхнею встановлено три мідно-ксантанові термопари, значення температури передавалися на МІГ-1.3 кожні 0,5 с. Такий спосіб вимірювання температури іноді вносить суттєву похибку, тому термопари були попередньо відградуйовані за допомогою лазерного пірометра DT-8855 і показували не температуру у місці їхнього встановлення, а температуру зовнішньої поверхні.

Проте система терморегуляції поверхні тертя потребує певного доопрацювання, адже вона не може достатньо точно встановлювати температуру поверхневого шару продукту. Подальші кроки для удосконалення методу – це підключення «Usb warmer cooler» через програму «Управління зовнішніми пристроями МІГ-1.3».

Кінцевим етапом розробки методу визначення термічної залежності коефіцієнта тертя було збирання установки, калібрування датчиків та апробація методу.

На рис. 3.6 наведено дослідження адгезійного напруження під час контакту зразків із поверхнею установки, виготовленої із нержавіючої сталі.

Визначення коефіцієнтів тертя проводили за восьми значень температур (від -5° до 45°C). Значення показників електронного динамометра знімалися за допомогою Універсального вимірювального приладу фірми «ІТМ» та програмного забезпечення «Мультимедійна фізична лабораторія» (див. рис. 3.6).

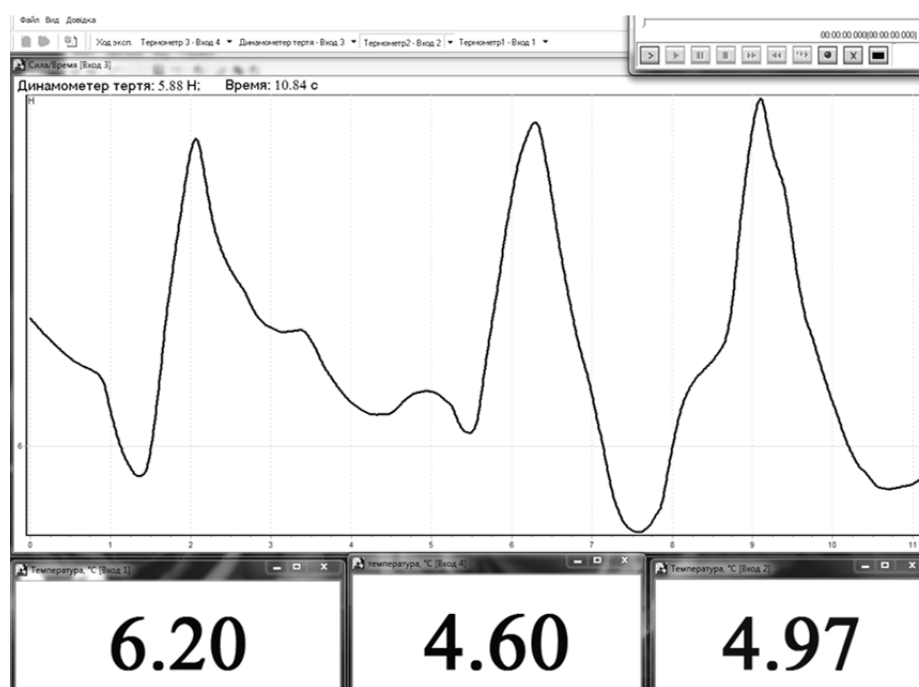


Рис. 3.6. Вікно програми «Навчальна лабораторія ІТМ». Показання датчиків при визначенні термічної залежності коефіцієнта тертя

Для подальшої обробки масив даних з чотирьох датчиків МІГ-1.3 експортовано до табличного редактора MS Excel.

3.3. Визначення міцності поверхні однорідних структур

Принцип роботи пенетрометра заснований на автоматичному вимірюванні максимальної сили проникнення індентора в продукт перпендикулярно до його поверхні та глибину (Н), на якій визначено цю силу.

За методом занурення індикатора міцність структури, зазвичай, оцінюють спеціальним показником – величиною, що характеризує ступінь проникнення індентора всередину дослідного зразка матеріалу під дією постійного навантаження. Цей показник виражається величиною граничного напруження зсуву, який характеризує міцність структури матеріалу при малих швидкостях деформації. Для оцінювання структури таких складних систем, як м'ясо, його використання проблематичне [67], тому запропоновано застосовувати циліндричний

індентор та, занурюючи його на постійній швидкості до постійної глибини, фіксувати силу опору продукту [68].

З метою врахування сили тертя поверхневих шарів, неоднорідності м'язової тканини, а також зменшення впливу випадкових похибок на результати вимірювання структурно-механічних властивостей продукції побудовано візуалізовані моделі сил, що виникають при проникненні індентора в продукт, та сил, що протидіють стискуванню при визначенні релаксаційного зусилля (рис. 3.7).

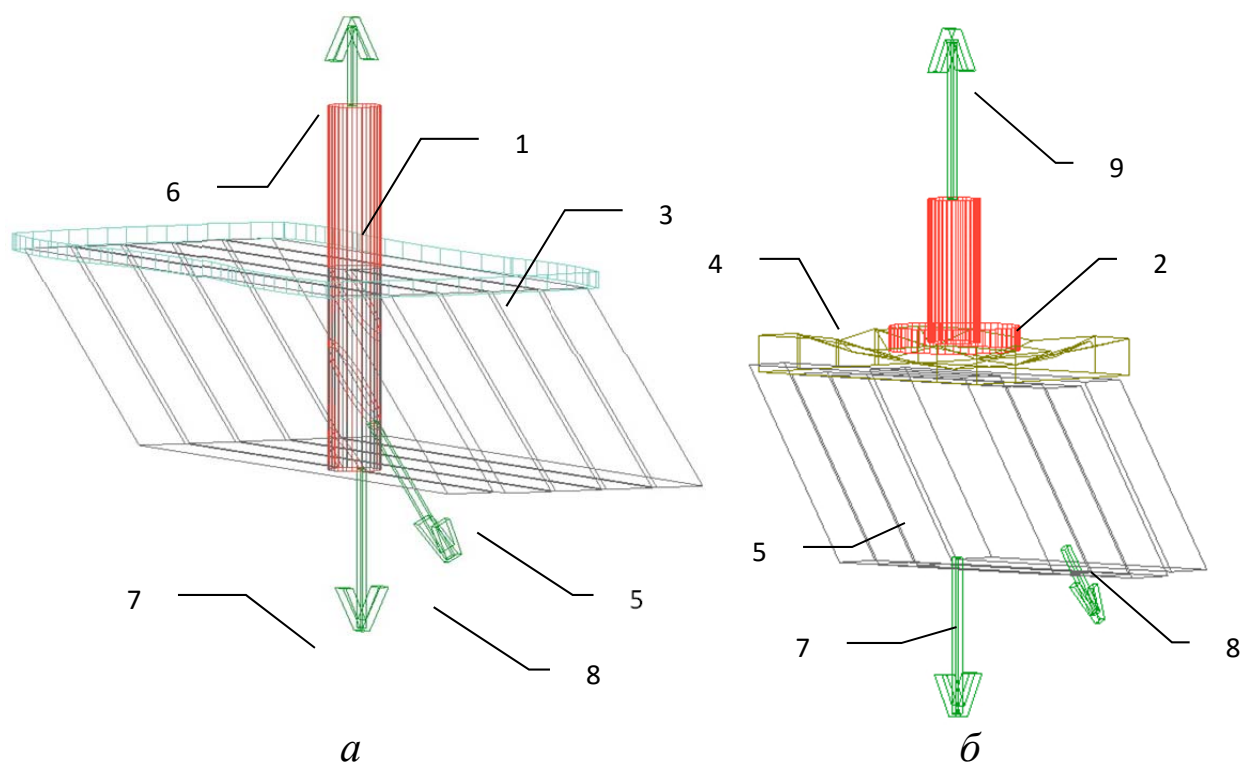


Рис. 3.7. Моделі сил, що виникають у процесі визначення структурно-механічних властивостей м'язової тканини:
а – сили, що виникають при зануренні індентора в продукт;
б – сили, що протидіють стисканню при визначенні релаксаційного зусилля; 1 – індентор; 2 – диск; 3 – шкірочка продукту;
4 – деформована поверхня продукту; 5 – шари м'язової тканини;
б – сила опору руху індентора ($F_{оп}$); 7 – сила натискання на індентор або диск (F_p); 8 – сила бокової деформації ($F_{бк}$);
9 – релаксаційне зусилля ($F_{релак}$)

Як видно з рис. 3.7, сила опору продукту деформації буде значно більшою при визначенні релаксаційного зусилля, ніж при деформації.

Виникнення сили бокової деформації пов'язане з розташуванням шарів м'язової тканини під певним кутом α до площини нарізання продукту. Оскільки згідно з результатами обробки графічної моделі визначення релаксаційного зусилля (рис. 3.7 а), вплив сили бокової деформації буде незначний, то у випадку визначення релаксаційного зусилля нею можна знехтувати. При визначенні реологічних властивостей продукту методом пенетрації вплив сили бокової деформації можна компенсувати:

$$F_k = F_{\text{бок}} \cos \alpha, \quad (3.6)$$

де F_k – проекція сили бокової деформації на вісь руху індентора (компенсаційна сила) (Н);

$F_{\text{бок}}$ – сила бокової деформації (Н);

α – кут між площинами нарізання та розшарування м'язової тканини (°).

Відповідно, зусилля пенетрації визначали як силу протидії руху індентора за компенсацією сили бічної деформації:

$$P_n = \frac{F_i - F_k}{S_i}, \quad (3.7)$$

де F_i – сила протидії руху індентора (Н);

S_i – площа індентора, м².

Рекомендуємо використовувати циліндричні індентори діаметром $d = 1 \dots 3$ мм та площею нижньої грані $S = 25,9 \div 77 \cdot 10^{-6}$ м². Глибину проникнення регулювати необхідно в межах $5 \div 15$ мм. Проте для продуктів із твердою структурою можна використовувати і загострені індентори. Обов'язковою умовою в останньому випадку є визначення кута заточення індентора

(β). Схему установки для перетраційних досліджень наведено на рис. 3.8.

Алгоритм проведення дослідження:

1. Визначити площу основи індентора.
2. Закріпити індентор на датчику сили МІГ-1.3.
3. Закріпити зразок для дослідження.
4. Дотримуючись інструкції роботи з МІГ-1.3, виконати дослідження.
5. Дотримуючись рекомендацій, викладених нижче, обробити отримані діаграми.
6. Виконати розрахунки за формулами 3.1–3.3.

Обрахунок коефіцієнта (k) проводимо за формулою:

$$k = \frac{F_n}{S}, \quad (3.8)$$

де S – площа основи індентора.

При обробці нижніх піків діаграми необхідно скористатися формулою зв'язку сили та в'язкості Ньютона:

$$F' = \eta \left(\frac{d\mathcal{G}}{dx} \right) S, \quad (3.9)$$

де S – площа індентора визначається як $S = \frac{\pi d^2}{4}$;

$d\mathcal{G}$ – миттєва швидкість, $d\mathcal{G} = \frac{d}{dt}(x)$.

Виконавши відповідні перетворення, отримуємо формулу для визначення молекулярного тертя:

$$\eta = SF'dt, \quad (3.10)$$

де F' – функція, отримана із експериментального графіка, як описано вище.

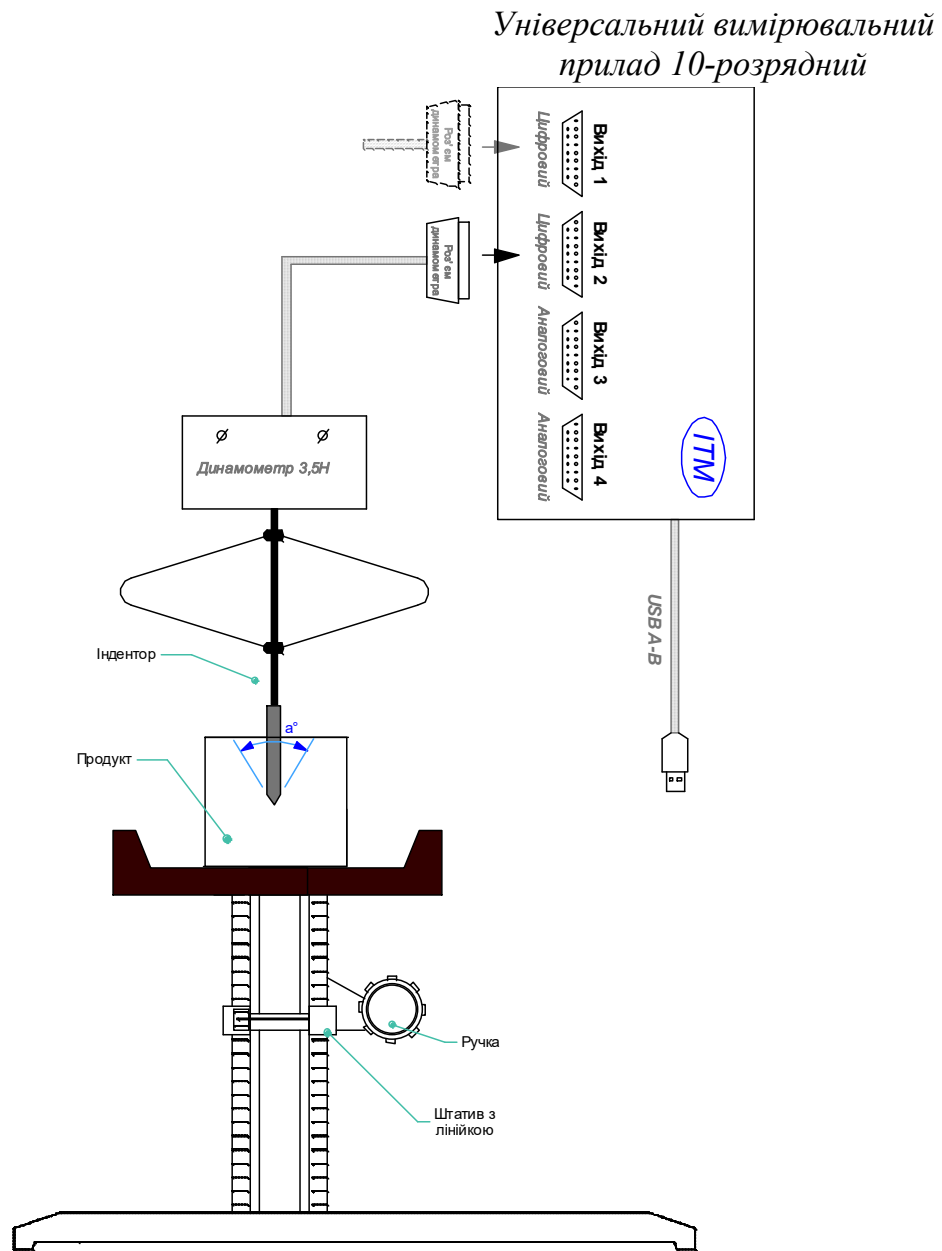


Рис. 3.8. Схема модуля «Поверхня». Установка для перетраційних досліджень сировини та продуктів

При зануренні індентора сила опору швидко збільшується (рис. 3.9 а), але після прориву поверхні зразка (а у нашому випадку – в’язових волокон у поверхневому шарі), опір м’язових тканин різко зменшується (рис. 3.9 б). Графік зміни сили опору за часом утворює пік (рис. 3.9 г), виміривши величину якого, можна розрахувати межу міцності поверхні продукту.

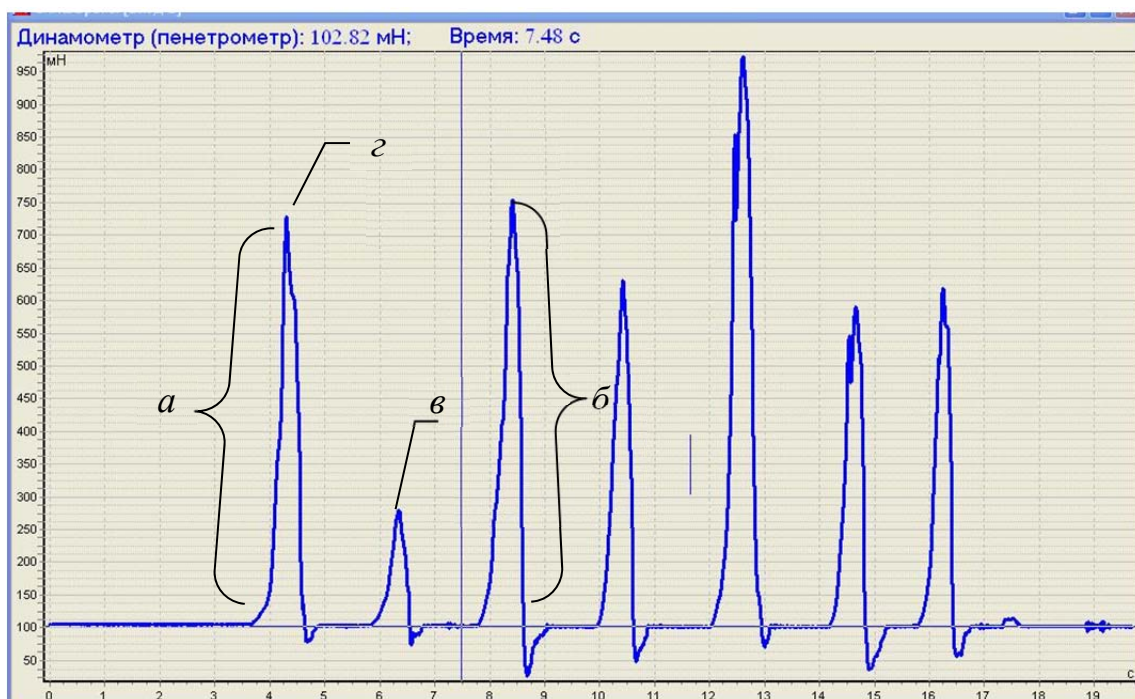


Рис. 3.9. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Визначення межі міцності поверхні зразка

За результатами penetрації отримали значення максимального навантаження, яке витримували зразки перед руйнуванням.

Як датчики використано розроблений напівпровідниковий термодатчик та високошвидкісний електронний динамометр фірми ІТМ з ціною поділки 1,5 мН та діапазоном вимірювань 0...4,75 Н. Невелика точність датчика пояснюється високою швидкістю роботи (10 000 вимірювань за секунду), яка необхідна під час дослідження швидкоплинних процесів, що відбуваються при penetрації. Визначаючи релаксаційне зусилля, частоту вимірювань зменшували до 100 с^{-1} . Це зумовлено необхідністю зменшити масив даних, який досягав інколи 8192 рядків.

Penetraцію проводили за допомогою циліндричного індентора діаметром 2,5 мм із швидкістю 0,32 м/с до сили опору 50 кПа. Отримані дані експортувалися до програми MS Excel, де проводилися математико-статистична обробка та регресійний аналіз.

Застосовуючи запропонований метод, можна визначити коефіцієнт пружності продукту, межу міцності поверхні та коефіцієнт молекулярного зчеплення побудовою відповідної діаграми дослідження (рис. 3.10).

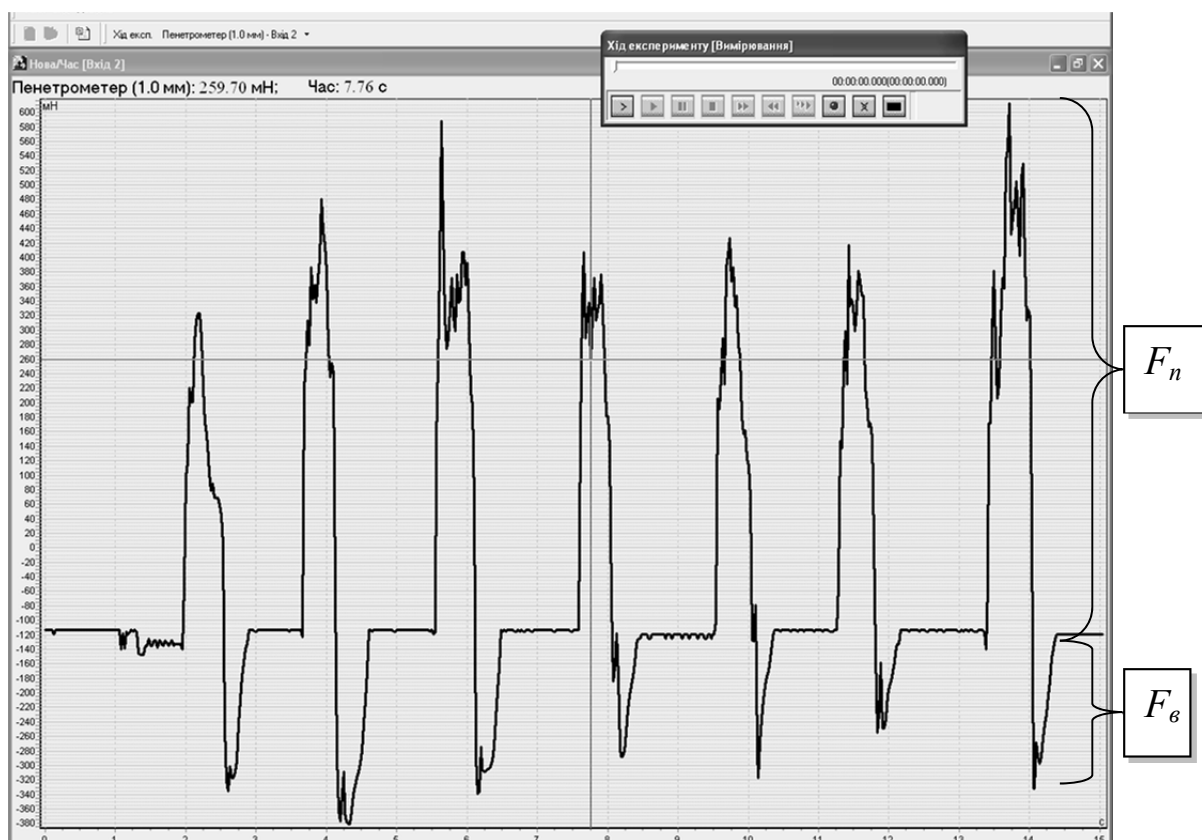


Рис. 3.10. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Визначення межі міцності шкірочки продукту:

F_n – сила проникнення індентора в продукт (у цьому випадку – межа міцності шкірки); $F_с$ – сила молекулярної взаємодії між рідиною, клітковиною та індентором площею S' (у цьому випадку – циліндричного індентора, $d = 2$ мм, глибина занурення – 6 мм)

Метод дозволяє визначити не лише силу проникнення індентора в матеріал, але і поведінку матеріалу під час виймання індентора, тим більше, що на діаграмі чітко видно час відповідної події.

Слід зазначити, що для скорочення часу експерименту доцільно виконувати дослід для кожного зразка в 5–10 повторах на одній діаграмі. На рис. 3.10 наведено результати вимірювань приблизно в центральній частині яблука.

При опрацюванні результатів penetрації не враховано три найбільших та найменших результати показань пенетрометра, також відкидалися результати penetрації, на яких не можна було виділити чіткий максимум сили (рис. 3.9 в). У процесі математико-статистичної обробки не бралися до уваги недостовірні результати (промахи), тому кількість достовірних результатів (n) для кожного зразка була індивідуальною.

Відносне penetраційне напруження (Θ_n) та межу міцності поверхні м'язової тканини (Θ_{og}) доцільно обраховувати за запропонованою О.Н. Савинок методикою [68]. Результати penetрації зразків філе індика наведено в табл. 3.1

Таблиця 3.1

Результати обрахунків penetрації межі міцності поверхні (на прикладі філе індика)

№ зразка	Penetraційне зусилля, мН				Відносне penetраційне напруження (Θ_n), Па	Межа міцності поверхні (Θ_{og}), Па
	P_{max}	P_{min}	\bar{P}	n		
1	955	534	734	8	3262,22	3849,42±137,12
2	948	432	692	11	3146,64	3713,07±87,18
3	946	352	627	9	2786,67	3288,27±116,05
<p><i>Примітка:</i> P_{max} – максимальна сила опору; P_{min} – мінімальна сила опору; \bar{P} – середнє арифметичне сили опору</p>						

Графічно реологічні властивості поверхні можна відобразити у вигляді діаграми (рис. 3.11).

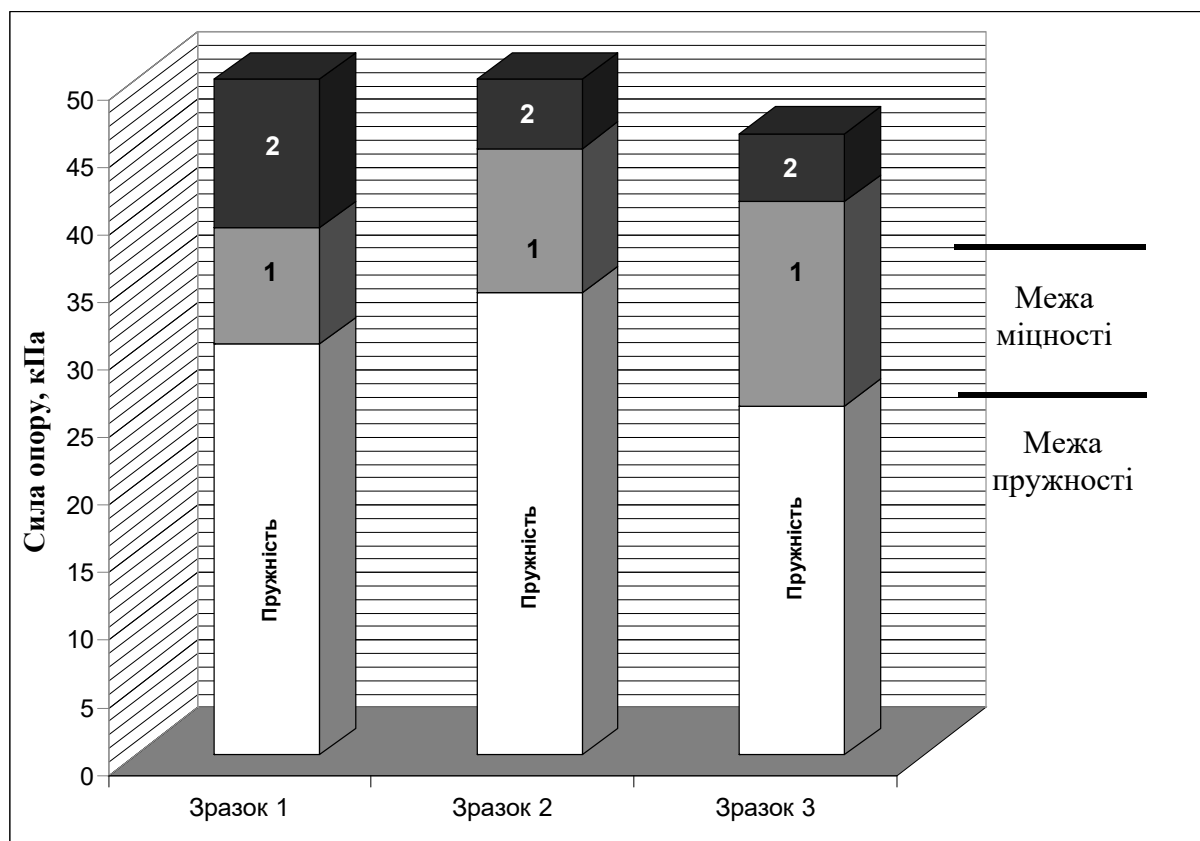


Рис. 3.11. Діаграма реологічних властивостей дослідних зразків: 1 – зона пластичності; 2 – зона руйнування

Зразки 1 і 3 мають значно ширший діапазон пружних властивостей, отже, можуть зберігати товарний вигляд під впливом більших деформаційних навантажень, що створює їхню конкурентну перевагу. Зразок 2 має широку зону пластичності, проте під впливом навантаження від 26,8 до 38,2 кПа продукт безповоротно змінює свою форму, що значно погіршує зовнішній вигляд і тому потребує використання твердих пакувальних матеріалів.

3.4. Визначення міцності поверхні неоднорідних структур

Міцність структури зазвичай оцінюють спеціальним показником – величиною, що характеризує ступінь проникнення індентора всередину дослідного зразка матеріалу під дією

постійного навантаження. Цей показник виражається величиною граничного напруження зсуву, який характеризує міцність структури матеріалу при малих швидкостях деформації [69].

Оскільки межею міцності називають напруження, що відповідає найбільшому навантаженню, яке витримує тіло перед руйнуванням [71], то пікове значення цифрового динамометра, яке можна отримати при максимальній деформації продукту, вказуватиме на межу міцності поверхневого шару продукту.

Якщо на продукт діє деяка сила \vec{F} , поверхня продукту прогинається. При деформації згином шари поверхні продукту, що лежать вище середини поверхні продукту, стискаються, а ті, що нижче, – розтягуються. На такій поверхні, яку називають осью, деформація відсутня. Середня лінія довжини частини продукту під впливом сили \vec{F} переміщується на деяку величину λ . Цю величину називають стрілою прогину [74]. Оскільки в дослідженні використовували продукт розміром 30x30 мм, а радіус кривизни становить близько 240 мм, то кривизною поверхні можна знехтувати та вважати, що продукт має прямокутну форму. Для продукту прямокутної форми шириною a , товщиною поверхневого шару δ й довжиною зразка l межа міцності шкірочки визначається за формулою:

$$\Theta_{gp} = \frac{F_{\max} l^3}{4a\delta^3 \lambda}, \quad (3.11)$$

де Θ_{gp} – межа міцності продукту, МПа;

l – довжина зразка продукту;

δ – товщина поверхневого шару продукту, мм;

a – ширина зразка поверхневого шару продукту, мм;

λ – максимальна відстань, на яку прогинається поверхневий шар продукту перед руйнуванням, мм;

F_{\max} – сила опору поверхневого шару продукту, що виникає при максимальній деформації, Н.

Диференціюванням рівності (3.11) знайдемо формулу для визначення відносної похибки:

$$\Delta \Theta_{zp} = \Theta_{zp} \left(\frac{\Delta F_{\max}}{F_{\max}} + 3 \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta a}{a} + 3 \frac{\Delta \delta}{\delta} + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right), \quad (3.12)$$

де $\Delta \Theta_{zp}$ – абсолютна похибка межі міцності продукту, МПа;

Δl , $\Delta \delta$, Δa , $\Delta \lambda$ – абсолютні похибки довжини, товщини, ширини та стріли прогину поверхні шару продукту відповідно, мм;

ΔF_{\max} – абсолютна похибка сили опору поверхневого шару продукту, Н.

Оскільки при визначенні структурно-механічних характеристик начинки складно аналізувати габаритні розміри фаршу без руйнування поверхневих шарів продукту, то при визначенні межі міцності фаршу [74] доцільно застосовувати метод, що не враховує габаритні розміри об'єкта, та визначати межу міцності поверхневого шару продукту як характеристику речовини, а не тіла [75].

Побудовано візуалізовану модель сил опору шарів продукту, що діють на циліндричний індентор під час рівномірного руху (рис. 3.12).

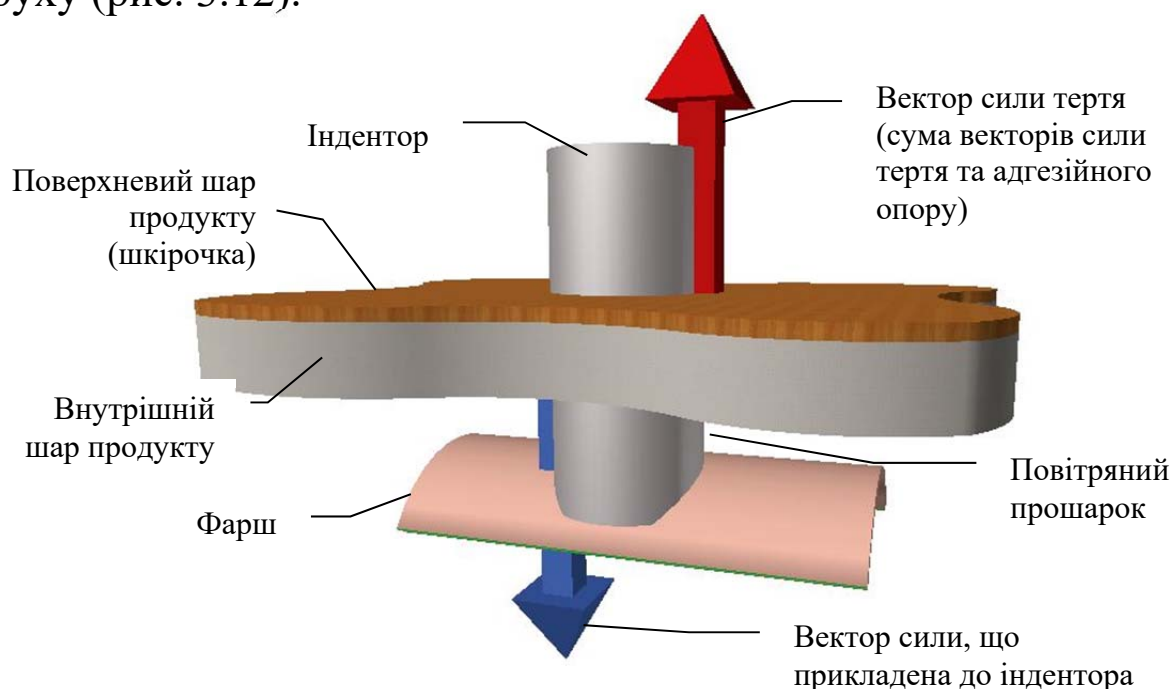


Рис. 3.12. Візуальна модель вертикального руху індентора у багатошаровому продукті

З моделі (рис. 3.12) видно, що руху індентора проти-діють сили тертя бічної поверхні індентора об шкірочку та внутрішній шар продукту, а також сила опору фаршу.

Під час руху індентора всередину продукту додаткову силу опору тертя індентора об попередні шари продукту:

$$F_{mp} = 2\pi r_{ind} (\mu_{ст-пр} \cdot \delta + A_{вн}), \quad (3.13)$$

де F_{mp} – сила тертя індентора з попередніми шарами продукту, Н;

δ – товщина поверхневого шару продукту, мм;

r_{ind} – радіус індентора циліндричної форми, мм;

$\mu_{ст-пр}$ – кінетичний коефіцієнт тертя між сталлю та шкірочкою продукту, Н/м²;

$A_{вн}$ – адгезія внутрішнього шару продукту, Н/м.

Отже, межа міцності продукту буде визначатися за формулою:

$$\Theta_{гр_ф} = \frac{4 \cdot (F_{max_ф} - F_{mp})}{\pi d^2}, \quad (3.14)$$

де $\Theta_{гр_ф}$ – межа міцності фаршу, МПа;

d – діаметер індентора, мм;

F_{max} – сила опору поверхневого шару фаршу, Н.

Програмне забезпечення «Лабораторія МІГ-1.3», яке вико-ристовували в дослідженнях, дозволяє визначити силу, що діє на індентор у будь-який момент часу. При проходженні інден-тором повітряного прошарку між продуктом та начинкою на індентор діє лише сила тертя ($F_{тр}$), отже, знаючи силу опору руху індентора у проміжок, коли індентор проходить через повітряний проміжок, можна визначити силу тертя (рис. 3.13).

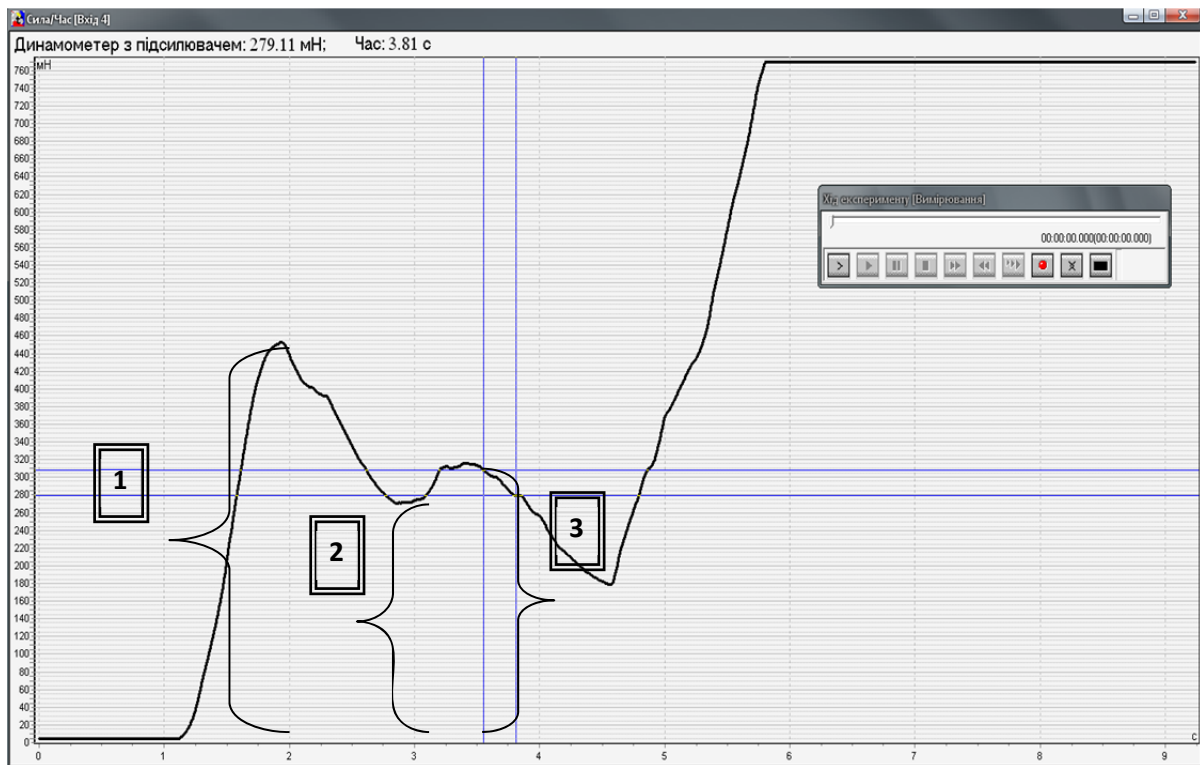


Рис. 3.13. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Фіксування сили опору руху індентора через продукт за сталої швидкості руху: 1 – сила опору поверхневого шару продукту, що виникає при максимальній деформації, (F_{\max}); 2 – сила тертя індентора з попередніми шарами продукту ($F_{\text{тр}}$); 3 – сила опору поверхневого шару фаршу (F_{\max})

При зануренні індентора сила опору швидко збільшується (рис. 3.13, 1), але після прориву поверхні зразка (а у нашому випадку – в'язових волокон у поверхневому шарі) опір м'язових тканин різко зменшується (рис. 3.13, 2). Графік зміни сили опору за часом утворює пік (рис. 3.13, 3), вимірявши величину якого, можна розрахувати межу міцності поверхні продукту.

Графічно залежність реологічних властивостей поверхні багатошарового продукту від вмісту одного з рецептурних компонентів можна зобразити диференціальним графіком (рис. 3.14).

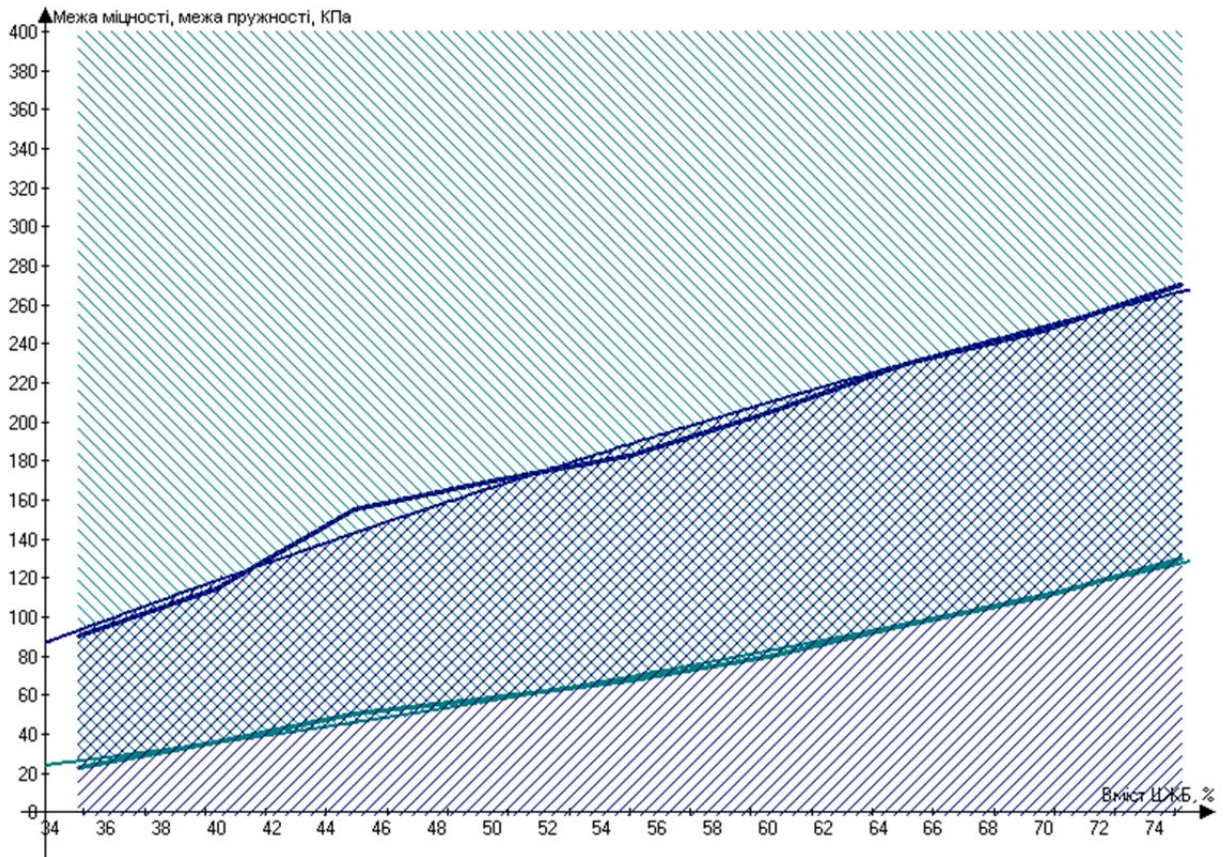


Рис. 3.14. Залежність межі міцності поверхні внутрішнього шару продукту (фаршу) від вмісту одного з компонентів

Отже, розроблено установку та методику, що надають змогу дослідити і проаналізувати структурно-механічні властивості поверхні продуктів, зокрема адгезію, межу міцності поверхні та швидкість руйнування структури.

Чутливість розробленого обладнання становить 0,002 Н, період вимірювання – 0,005 с, що дозволяє визначати органолептично невідчутні зміни реологічних властивостей продуктів.

Розділ 4

БУДОВА, КОМПЛЕКТАЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДУЛЯ «ОПТИКА» ПРИЛАДУ МІГ-1.3

4.1. Визначення каламутності продуктів

Важливим показником якості харчової дисперсної системи є наявність механічних домішок – завислих твердих частинок або крапель нерозчинних рідин. Оскільки більшість рідких фракцій продуктів є складними багатокомпонентними системами, перед виробниками постає складне завдання – досягти максимальної прозорості за прийнятного хімічного складу і мінімальної ціни [76]. На практиці це відбувається у процесі прискорення седиментації твердих частинок, проте коли споживач перекидає споживчу тару, вивчаючи характеристики товару, каламутність рідкої фракції продуктів різко зростає, що може справити враження несвіжості основного продукту.

Завислі у воді тверді частинки порушують проходження світла через зразок води і створюють кількісну характеристику води, так звану каламутність. Американська асоціація охорони здоров'я (АРНА) визначає каламутність, як чисельну характеристику оптичної властивості, що викликає розсіювання і поглинання світла. Каламутність можна розглядати як характеристику відносної прозорості рідини. Вимірювання каламутності – це не пряме визначення кількості суспензії в рідині, а вимірювання величини розсіювання світла [77].

Каламутність – це результат розсіювання світла на завислих у рідині твердих частинках, що залежить від розміру, форми і складу частинок, а також від довжини хвилі падаючого світла. Саме зважаючи на це, у більшості сучасних приладів для визначення каламутності застосовують монохроматичне випромінювання [78].

Просторовий розподіл розсіяного світла визначається відношенням розміру частки до довжини хвилі (λ). Частинки з меншим розміром, ніж довжина хвилі падаючого світла зумовлюють майже симетричне розсіювання світла. Із збільшенням розмірів частинок інтерференційна картина зміщується у напрямку проходження падаючого світла. Проте більшість рідких та желеподібних продуктів харчування мають набагато більші розміри завислих частинок, ніж довжина хвилі червоного світла (620...680 нм), що дозволяє використовувати для визначення каламутності монохроматичне випромінювання потужних та доступних газорозрядних лазерів [79].

У процесі визначення фізико-хімічних властивостей рідких продуктів харчування, серед яких важливими показниками є каламутність та швидкість седиментації частинок, доцільним є використання оптичних методів дослідження. Передусім ці методи слід застосовувати, коли існує необхідність у проведенні великої кількості дослідів.

Прозорість (каламутність) колоїдних розчинів, емульсій, суспензій визначається у прохідному світлі, тобто проба повинна міститися між джерелом світла та приладом, що фіксує його інтенсивність. У світовій практиці загальноприйнятими є дві одиниці каламутності: formazine nephelometric unit – фармацевтична одиниця каламутності (далі – FNU) та каолінова одиниця каламутності, що вказують на вміст (мг/л) формазину та каолінової глини, відповідно, в еталонному розчині, який має такий же коефіцієнт оптичної екстинкції, що і досліджуваний зразок [80].

Сучасні інструменти визначають каламутність у широкому діапазоні від високих до гранично низьких значень. Можливість приладу визначати каламутність у широких межах залежить від його конструкції. Переважно вимірювання проводяться в діапазоні 1 FTU (міжнародна одиниця каламутності) і нижче, але більшість продуктів харчування мають каламутність у діапазоні від 0,5 до 4,3 FTU [81].

За здатністю харчових продуктів змінювати напрямок поширення світлового потоку, що характеризується коефіцієнтом

заломлення, можна визначати показник прозорості або каламутності рідких харчових продуктів з метою оцінювання їхньої якості та можливості зберігання.

Відомо два основних кількісних методи визначення каламутності. Перший ґрунтується на вимірюванні кута розсіювання випромінювання та визначенні коефіцієнта спектральної дифузії; каламутність води визначається за допомогою оптичного нефелометра. Суттєвим недоліком цього методу є можливість дослідження зразків лише з низьким рівнем каламутності.

Другий спосіб полягає у вимірюванні поглиненого випромінювання та визначенні коефіцієнта спектральної адсорбції за допомогою нефелометра. Сфера використання цього методу значно ширша, проте особливості, пов'язані з калібруванням нефелометрів, коли вводиться коефіцієнт відбивання/поглинання випромінювання склом кювети не дозволяють визначити каламутність на різній глибині одного зразка, до того ж відсутні поправки на неоднорідність оптичних характеристик заливки [82].

Серед українських вчених над проблемою визначення та моделювання оптичних властивостей рідкої фази рибної продукції однією з перших почала працювати команда науковців під керівництвом О.В. Сидоренко [83]. Запропонований ними спосіб визначення каламутності рибних бульйонів із використанням когерентного монохроматичного випромінювання та високошвидкісного люксметра направленої фіксації дозволяє визначати коефіцієнт екстинкції рідких продуктів із високою швидкістю седиментації.

Переваги запропонованого методу полягають у тому, що, по-перше, існує можливість визначення каламутності бульйону на певній глибині; по-друге, застосовуються когерентні монохроматичні хвилі з товщиною 660 нм, що значно розширює межі вимірювання каламутності; по-третє, такий метод не потребує використання світлонепроникних камер; по-четверте, відсутній вплив оптичних властивостей кювети на результати досліджень, що значно підвищує точність вимірювання.

Хоча на сьогодні розроблено багато методів з визначення каламутності, вони майже всі налаштовані на фіксацію змін якості води – раптова зміна каламутності може вказувати на додаткове джерело забруднення. Рідкі та желеподібні продукти харчування через досить високі значення каламутності та кольорову неоднорідність створювали досить значну похибку вимірювань [84].

Ліофобна дисперсна система послаблює випромінювання, що проходить через зразок і, крім того, присутні нерозчинені речовини нерівномірно розсіюють випромінювання в різних напрямках. Розсіювання випромінювання частинками цих речовин впливає на ослаблення до такої міри, що коефіцієнт загального спектрального ослаблення випромінювання $\mu(\lambda)$ є сумою коефіцієнтів спектральної дифузії $s(\lambda)$ і спектральної абсорбції, $\alpha(\lambda)$. Отже, визначивши коефіцієнт спектральної адсорбції можна порахувати коефіцієнт екстинкції (послаблення) випромінювання (τ). У випадку, коли випромінювання монохроматичне, коефіцієнт екстинкції (послаблення) дорівнює коефіцієнту спектральної абсорбції:

$$\tau = \alpha_{\lambda=const} \cdot \quad (4.1)$$

Якщо відомо коефіцієнт спектральної абсорбції $\alpha(\lambda)$, можна визначити коефіцієнт спектральної дифузії $s(\lambda)$.

Щоб вирахувати коефіцієнт спектральної абсорбції ліофобної дисперсної системи, необхідно зачекати 15...30 с для седиментації великих частинок. У деяких зразках можна видалити великі нерозчинні речовини фільтрацією, однак це може призвести до перешкод, тому на практиці вилучити великі частинки досить важко, проте вищезгаданий показник легко фіксується МІГ-1.3. Тому у протоколі випробування результати визначання каламутності води необхідно надавати в порівнянні з каліброваним розчином.

Для калібрування дослідної установки на базі МІГ-1.3 не можна використовувати харчові дисперсні системи через нестабільний хімічний склад та різні розміри дисперсних

частинок, відповідно, їх каламутність може суттєво змінюватися. Також у харчових дисперсних системах, особливо ліофобних, занадто висока швидкість седиментації, тому прилади для визначення каламутності калібрують за розчином формазину.

Коефіцієнт екстинкції (спектральної абсорбції) світлового або електромагнітного випромінювання тілом визначають за формулою:

$$t = \frac{1}{d_{\text{зразка}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{зразка}} - I_0}, \quad (4.2)$$

- де t – коефіцієнт екстинкції, мм^{-1} ;
 I_0 – інтенсивність фонового світлового потоку, Лм;
 I_1 – інтенсивність світлового потоку при увімкненому лазері без кювети з досліджуваним зразком, Лм;
 $I_{\text{зразка}}$ – інтенсивність світлового потоку після проходження зразка, Лм;
 $d_{\text{зразка}}$ – товщина зразка, мм.

Інтенсивність світлового потоку ($I_{\text{зразка}}$) в нашому випадку виражено значенням датчика прямого світла ($I_{\text{прям}}$). Інтенсивність фонового світлового потоку (I_0) визначається експериментатором безпосередньо перед проведенням експерименту, після ввімкнення приладу вимірювання та визначення середнього світлового потоку із показань всіх трьох датчиків.

Складність проведення вимірювань полягає у тому, що згаданий вище коефіцієнт екстинкції є сумою коефіцієнтів послаблення світлового потоку кюветою ($t_{\text{кюв}}$) та зразком ($t_{\text{зр}}$). Оскільки нам необхідно визначити загальну складову послаблення випромінювання кюветою, то коефіцієнт екстинкції кювети можна легко виміряти, провівши додатковий експеримент:

$$t_{\text{кюв}} = \frac{2}{d_{\text{скла}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{прям_кюв}} - I_0} + \frac{1}{d_{\text{кюв}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{пов}} - I_0}, \quad (4.3)$$

- де $t_{\text{кювет}}$ – коефіцієнт екстинкції кювети, мм^{-1} ;
 $d_{\text{скла}}$ – товщина скла кювети, мм ;
 $d_{\text{кювет}}$ – ширина внутрішньої частини кювети, мм ;
 I_0 – інтенсивність фонового світлового потоку, Лм ;
 I_1 – інтенсивність світлового потоку при увімкненому лазері без кювети, Лм ;
 $I_{\text{прям_кювет}}$ – інтенсивність світлового потоку після проходження кювети (показники датчика прямого світла), Лм ;
 $I_{\text{пов}}$ – інтенсивність світлового потоку після проходження повітря всередині кювети (показники датчика прямого світла), Лм .

Якщо послабленням інтенсивності світлового потоку в повітрі на невеликій відстані можна знехтувати, тоді:

$$\frac{I_1 - I_0}{I_{\text{пов}} - I_0} = 1. \quad (4.4)$$

Підставивши значення виразу (4.4) у формулу (4.3), отримаємо:

$$\begin{aligned} t_{\text{кювет}} &= \frac{2}{d_{\text{скла}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{прям_кювет}} - I_0} + \frac{1}{d_{\text{кювет}}} \ln 1 = \\ &= \frac{2}{d_{\text{скла}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{прям_кювет}} - I_0}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Таким чином, формула визначення коефіцієнта екстинкції зразка матиме вигляд:

$$t_{\text{зр}} = t - t_{\text{кювет}} = \frac{1}{d_{\text{зразка}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{зразка}} - I_0} - \frac{2}{d_{\text{скла}}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{\text{прям_кювет}} - I_0}. \quad (4.6)$$

Показник інтенсивності світлового потоку при увімкненому лазері без кювети з досліджуваним зразком можна

вирахувати, знаючи розподіл інтенсивності світла дифракційною ґраткою та показання датчика меншого максимуму. Якщо знайти розподіл інтенсивності світла залежно від кута дифракції (φ), то можна, знаючи інтенсивність світла в будь-якій точці розподілу та кут поширення променя (φ), визначити інтенсивність прямого (незаломленого) променя.

Припустімо, що на дифракційну ґратку перпендикулярно до її поверхні (тобто кут падіння $\varphi = 0$) падає плоскополяризована монохроматична хвиля з довжиною $\lambda = 663$ нм.

Від елементарної зони dx щілини з номером n у напрямі, що визначається кутом φ , поширюватиметься хвиля, рівняння якої можна записати як

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz). \quad (4.7)$$

У формулі (4.7) $k(n-1)\sin\varphi$ описує зміну фази, обумовлену різницею ходу $(n-1)\sin\varphi$ променя в напрямі φ , що виникає при переході від періоду з номером 1 до періоду з номером n , тоді:

$$e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi. \quad (4.8)$$

Подальший алгоритм наводити недоцільно, оскільки функція розподілу випромінювання детально описана професором В.І. Найденком [2].

Інтенсивність світла за ґратками визначається добутком множника елемента ґратки і множника ґратки.

$$\sin\varphi = \pm \frac{I_0}{N} \lambda, \quad (4.9)$$

де N – ціле число – множник елемента дифракційної ґратки.

Загальна залежність згідно з формулами (4.8) та (4.9) визначається добутком двох функцій. Найбільший максимум

функції досягається при $\frac{b}{\lambda} \sin \varphi = 0$ і дорівнює 0,26533, або 26,5% початкової інтенсивності світлового потоку. Перший максимум функції досягається при $\frac{b}{\lambda} \sin \varphi = 0,5$ і дорівнює 0,11547, або 11,5% початкової інтенсивності світлового потоку.

Підставивши отримані значення у формулу (4.7), отримаємо алгоритм для визначення коефіцієнта екстинкції (спектральної дифузії):

$$t_{зр} = \frac{1}{d_{зразка}} \ln \frac{2,298 \cdot I_{1_max} - I_0}{I_{зразка} - I_0} - \frac{2}{d_{скла}} \ln \frac{2,298 \cdot I_{1_max} - I_0}{I_{прям_кюв} - I_0}, \quad (4.10)$$

де 2,298 – коефіцієнт перерахунку інтенсивності світлового потоку на датчику першого максимуму;

I_{1_max} – інтенсивність світлового потоку на датчику першого максимуму.

Каламутність досліджуваних зразків визначаємо за формулою:

$$S = k \cdot t_{зр}, \quad (4.11)$$

де t – коефіцієнт екстинкції, мм^{-1} ;

k – коефіцієнт перерахунку у відповідні одиниці вимірювання (для каоліну – 3,308 мг/л; для міжнародних одиниць – 0,43 FTU за формазином).

Прозорість дисперсної системи визначається на базі приладу ESPE-1 з газорозрядним лазером ЛГ-208А експериментальним методом, який ґрунтується на ISO 7027 з використанням МІГ-1.3 та комплекту цифрових оптичних датчиків (кремнієві оптичні сенсори з частотою роботи 10 000 Гц), відградуєваних відповідно до червоної шкали люксметра Ю117. Схема установки наведена на рис. 4.1.

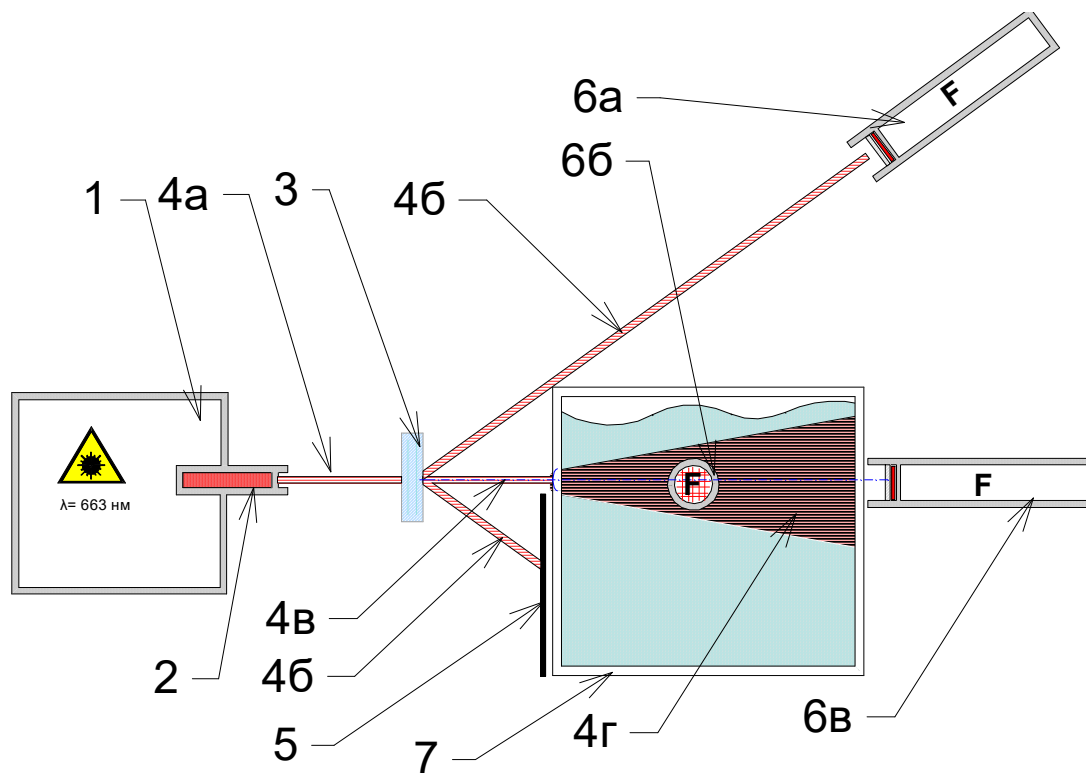


Рис. 4.1. Схема установки для визначення каламутності:
 1) оптична лазерна установка ESPE-1; 2) лазерний випромінювач ЛГ 208 другого класу; 3) дифракційна ґратка 1:250; 4) лазерний промінь (4а – промінь до проходження дифракційної ґратки, 4б – промінь першого максимуму, 4в – промінь головного максимуму, 4г – конус розсіювання променя у досліджуваному зразку); 5) непрозорий екран; 6) оптичні датчики (6а – контрольний датчик променя першого максимуму; 6б – нефелометричний датчик; 6в – датчик прямого світла); 7) кювета з досліджуваним зразком

Дослідження каламутності зразка на установці (рис. 4.1) здійснюється за таким алгоритмом:

1. Прямокутну кювету (рис. 4.1, 7) з високоякісного оптичного скла ретельно миють та прополіскують у дистильованій воді не менше 3-х разів.

2. Після ополіскування кювети її поміщають в ультразвукову ванну на 4...5 хв.

3. Робочі грані кювети полірують силіконовим мастилом.

4. Експериментатор вмикає вимірювальний прилад на 23...30 с без кювети для визначення освітленості зони проведення експерименту (I_0). Значення освітленості визначають як середнє між показаннями усіх трьох датчиків освітленості.

5. Пусту кювету встановлюють перпендикулярно до центрального лазерного променя та визначають інтенсивність світлового потоку після проходження кювети – показники датчика прямого світла ($I_{\text{прям_кюв}}$).

6. Досліджувану рідину наливають до кювети.

7. На лазерному випромінювачі ESPE-1 виставляють поляризатор та дифракційну ґратку 1:250.

8. Встановлюють кювету чітко перпендикулярно лазерному променю (рис. 4.1, 4 а).

9. Вмикають початок вимірювань на панелі управління експериментом програми «Лабораторія МІГ-1.3».

10. Час експерименту встановлюється відповідно до швидкості седиментації досліджуваного зразка (орієнтовно це можна визначити за зростанням показників датчика прямого світла та нефелометричного датчика).

11. Після стабілізації показників вищезгаданих датчиків експериментатор зупиняє вимірювання. Слід пам'ятати, що прилад МІГ-1.3 працює з частотою 1000 Гц, тому за кожну хвилину експерименту отримуємо 60 000 нових значень, що дещо ускладнює роботу комп'ютера та може викликати збої у роботі табличного процесора (наприклад, MS Excel).

12. Отримавши графіки показників оптичних датчиків, експериментатор зберігає повністю експеримент у програмі «Лабораторія МІГ-1.3» або фотографує екран (клавiша «Print Screen» на клавіатурі комп'ютера). Фотографію екрана слід робити лише в тому випадку, коли опрацювання результатів експерименту відбуватиметься на комп'ютерах, де не встановлено програму «Лабораторія МІГ-1.3».

13. Для опрацювання результатів вимірювання весь масив даних експортується у програму роботи з таблицями (кнопка «Експорт до Excel» у вікні програми «Лабораторія МІГ-1.3»). Інтерполяція показань датчиків, а також виведення

функції зміни освітленості у часі для визначення каламутності не рекомендується. Якщо експериментатор має на меті не лише визначити каламутність, а й оцінити швидкість седиментації дисперсної системи, тоді доцільно встановлення математичної залежності показань світлового потоку датчика прямого світла у часі, але лише після математико-статистичної обробки цих показань та відкидання зон нерівномірності, обумовлених вмиканням-вимиканням лазера.

14. Визначення каламутності дисперсної системи проводять за формулою (4.11) у конкретний момент часу експерименту.

На рис. 4.2 наведено приклад вікна програми «Лабораторія МІГ-1.3» для роботи розробленою нами установкою визначення каламутності дисперсних систем. У верхній лівій частині екрана розміщено панель управління експериментом.

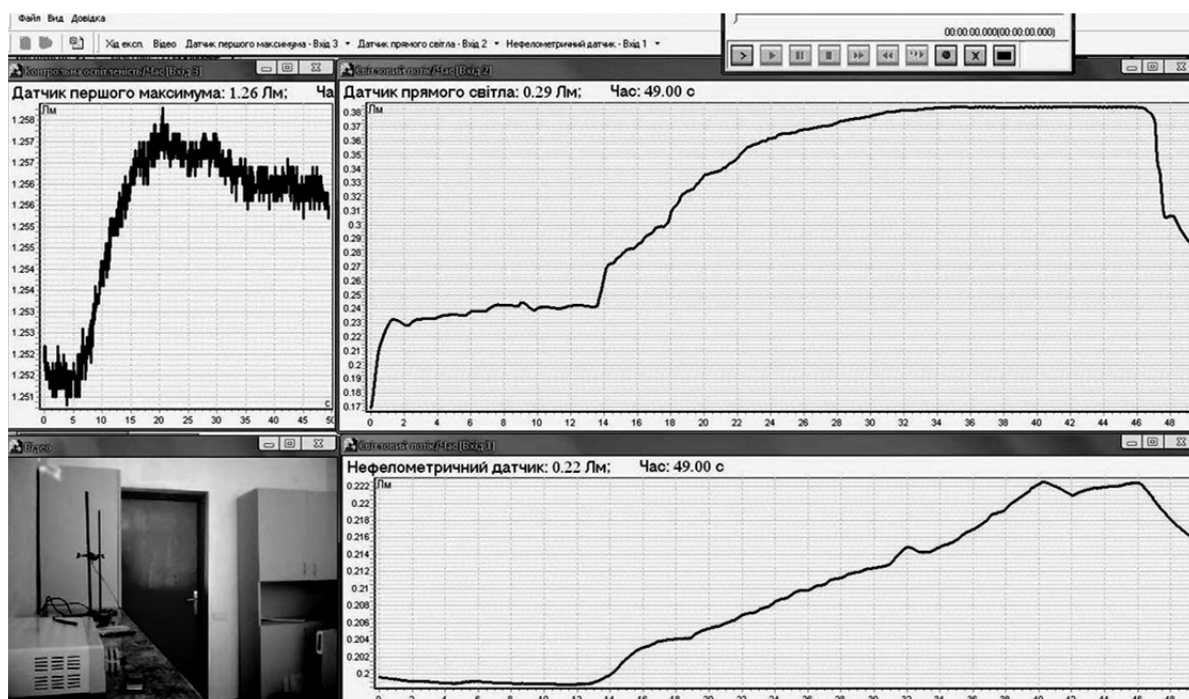


Рис. 4.2. Приклад зняття показників оптичних датчиків для визначення каламутності дисперсних систем (вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3»)

Вікно програми розділене на 4 нерівні частини. Частину екрана (2/3) займають графіки показань найважливіших датчиків – нефелометричного та датчика прямого світла. У лівій частині вікна розташований графік показань датчика першого максимуму та вікно відеозапису експерименту. Можливість програми «Лабораторія МІГ-1.3» записувати відео експерименту синхронно з показаннями всіх датчиків дозволяє переглянути хід проведення дослідження, виявити помилки та неточності постановки дослідження, а також явища, що впливали на точність дослідження, оскільки безпосередньо в процесі визначення каламутності, який триває від 30 до 120 с, все вищезгадане виконати неможливо.

На рис. 4.2 видно, що показання датчика першого максимуму незначно коливаються, але, якщо повернутися до схеми установки визначення каламутності (рис. 4.1), то можна зазначити, що, оскільки між дифракційною ґраткою та вищезгаданим датчиком немає досліджуваного зразка, то значення світлового потоку першого максимуму не повинно змінюватися. Ці коливання можуть бути спричинені декількома явищами: по-перше, це зміна світлового потоку лазерної установки ESPE-1 (незважаючи на стабільність роботи газорозрядних лазерів, виробники допускають коливання світлового потоку $\pm 3\%$), по-друге, за час проведення експерименту (50 с) може змінитись освітленість зони проведення експерименту, по-третє, різке зростання показників з 5 по 20 с може бути спричинене розсіяним зразком випромінювання. Як доказ останньої версії варто навести різкий стрибок показань нефелометричного датчика (датчика розсіяного випромінювання) якраз на 20-й секунді експерименту, коли показання датчика першого максимуму досягли свого найвищого значення. Та оскільки коливання значень світлового потоку першого максимуму не перевищують 1,003%, то ці показники не можуть внести суттєву похибку в результати експерименту.

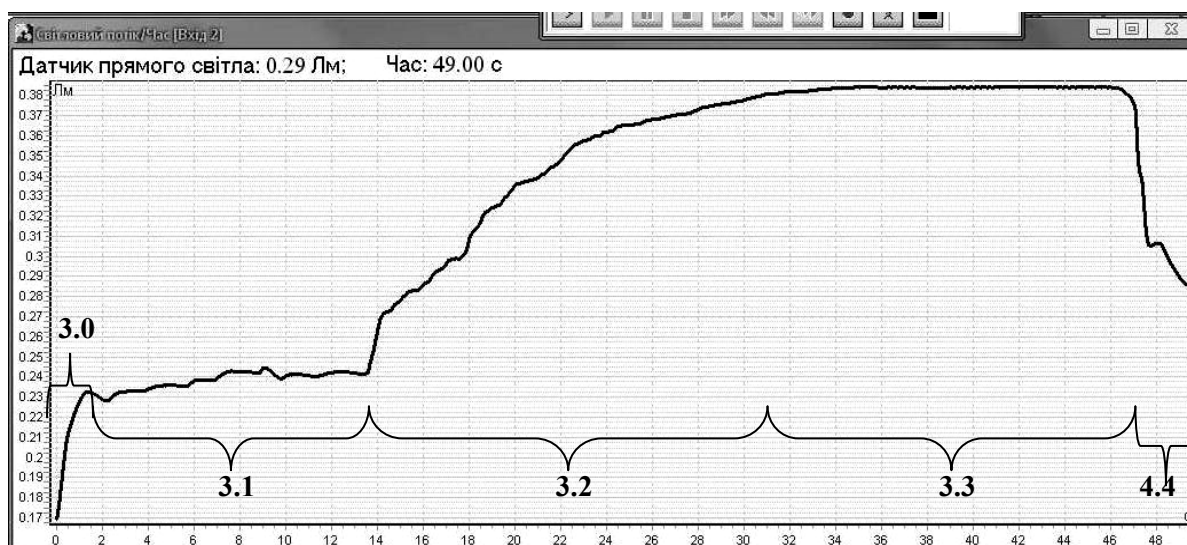


Рис. 4.3. Вікно графіка показників датчика прямого світла

З наведеного прикладу зняття показників оптичних датчиків виділимо найголовніший графік – показання датчика прямого світла.

Крім того, формулою розрахунку каламутності (4.11) передбачено визначення світлового потоку головного максимуму через світловий потік першого максимуму, що пояснює компенсацію будь-яких коливань світлового потоку.

На графіку показників світлового потоку датчика прямого світла можна виявити декілька зон:

- 3.0 – зона стабілізації роботи датчика;
- 3.1 – зона інтенсивності світлового потоку природного фону;
- 3.2 – зона підвищення інтенсивності світлового потоку, зона із вмиканням лазерного випромінювача (різке підвищення інтенсивності світла на початку зони), поступове підвищення інтенсивності світлового потоку, пов'язане із седиментацією частинок та зниженням каламутності рідини, стрибки показань датчика прямого світла можуть бути пов'язані із явищем світлового тиску;

3.3 – зона стабільності показників, що пов'язано із суттєвим зменшенням швидкості седиментації частинок та стабілізацією показників каламутності дисперсної системи; саме у цій зоні, якщо інше не було метою досліджень, рекомендовано визначати каламутність дисперсної системи;

3.4 – зона завершення експерименту (вимикання лазерного випромінювача та повернення до значень фонового світлового потоку).

На рис. 4.4 наведено зображення кювети із досліджуваним зразком під час проходження лазерного випромінювання без дифракційної ґратки (один промінь). Зразки фотографували в темряві без використання фотоспалаху.

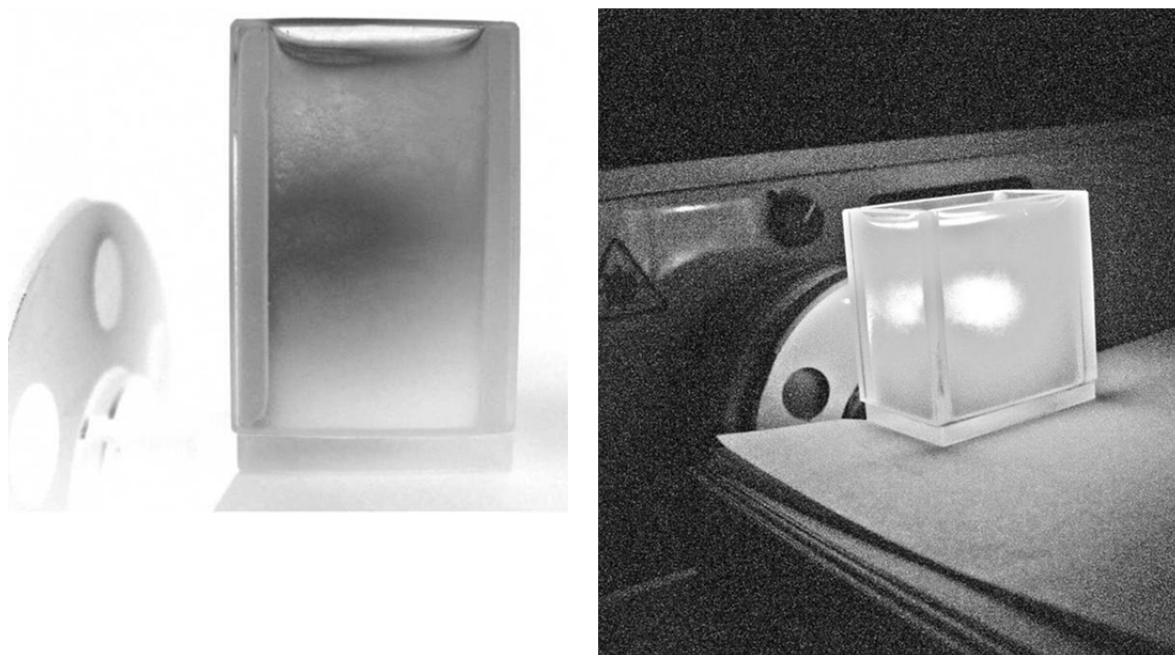


Рис. 4.4. Фотографії кювет з досліджуваними зразками під час проходження лазерного променя. Ліве зображення – інвертоване

Отже, розроблений метод визначення каламутності дисперсних систем дозволяє не лише точно та швидко визначати оптичні властивості рідин в обмеженому діапазоні каламутності, а і створювати математичні моделі швидкості седиментації досліджуваної системи.

4.2. Визначення швидкості седиментації дисперсних систем

Наведений вище метод визначення каламутності дисперсних систем дозволяє отримувати математичні моделі залежності інтенсивності проходження світлового потоку через продукт (швидкості седиментації).

Існує багато способів визначення стійкості дисперсних систем. Найбільш поширені методи стійкості дисперсних систем засновані на седиментаційному аналізі. Метод графічного диференціювання кривих седиментаційного аналізу дозволяє досить швидко визначити стійкість як ліофільних, так і ліофобних дисперсних систем. Однак недоліками такого методу є невисока точність, необхідність використання спеціального обладнання, зокрема швидкісних центрифуг, та неможливість аналізу динаміки осаджування частинок [85].

Аналітичний метод має більшу точність, ніж метод графічного диференціювання, крім того, дозволяє побудувати криву розподілу частинок суспензії за розмірами. Однак в основу аналітичного методу покладено аналіз седиментаційних кривих, які неможливо побудувати без спеціального обладнання, тому немає можливості визначити динаміку осаджування частинок суспензії [86].

Спосіб визначення швидкості седиментації дисперсних систем ґрунтується на методі фотометричного визначення каламутності води (ISO 7027), яким визначають коефіцієнт послаблення монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 530 \pm 30$ нм, проте автори використовували газорозрядну лазерну установку ESPE-1 з довжиною хвилі $\lambda = 663$ нм. Оскільки хвилі більшої довжини проходять

дисперсну систему з мінімальним показником розсіювання, це дозволяє вимірювати динаміку седиментації частинок у значно ширшому діапазоні каламутності рідини. Крім того, запропонований спосіб надає змогу побудувати математичну модель динаміки седиментації частинок суспензії – стійкість ліофобних дисперсних систем – на будь-якій глибині зразка.

За допомогою законів теорії розсіювання визначають коефіцієнт послаблення зонduючого випромінювання за формулою:

$$t = \frac{1}{l} \ln \left(\frac{\sqrt{(2 \cdot I_0 - I_\phi)^2 - 4 \cdot I_{\text{відб}}^2}}{I_{\text{посл}} - I_\phi} \right), \quad (4.12)$$

де l – товщина шару суспензії (мм);

I_0 – інтенсивність падаючого (зонduючого) випромінювання, Лм;

$I_{\text{відб}}$ – інтенсивність відбитого випромінювання, Лм;

I_ϕ – інтенсивність фонового випромінювання (рівень освітленості при вимкненому лазері), Лм;

$I_{\text{посл}}$ – інтенсивність послабленого випромінювання, Лм.

Установка для визначення динаміки седиментації дисперсної системи (рис. 4.5) аналогічна установці для визначення каламутності, проте у випадку дослідження динаміки седиментації доцільно застосовувати МІГ-1.3 із 16-розрядним аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП) та веб-камерою для фіксації експерименту.

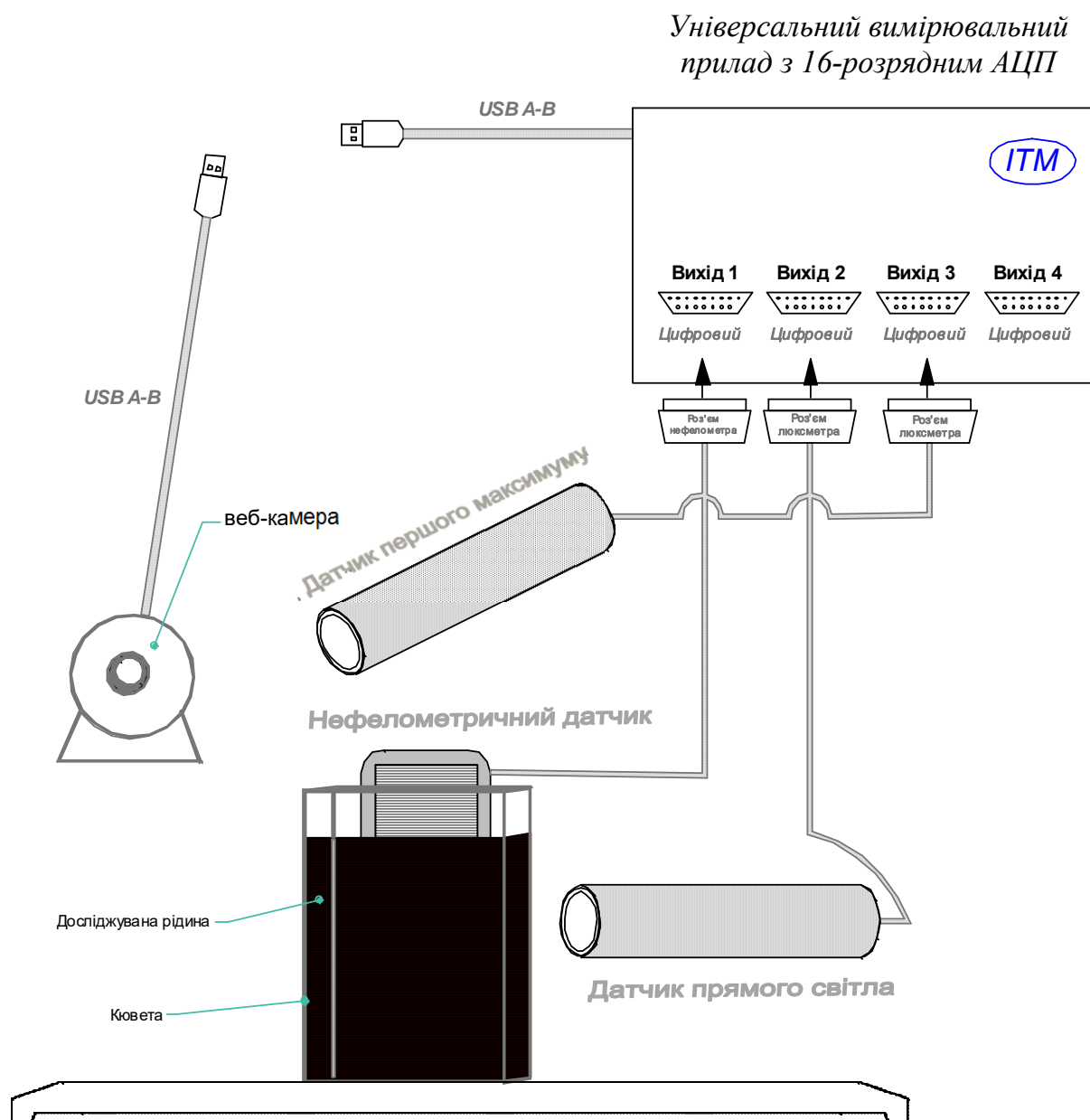


Рис. 4.5. Установа для визначення динаміки седиментації дисперсної системи

Дослідження здійснюють за таким алгоритмом (попередньо підготувавши кювети та зразок):

1. Досліджувану рідину наливають до кювети.
2. На лазерному випромінювачі ESPE-1 виставляють поляризатор та дифракційну ґратку 1:250.
3. Кювету із зразком розміщують у центрі інтегруючої сфери перпендикулярно до лазерного променя з довжиною хвилі $\lambda = 663$ нм.

4. Вмикають початок вимірювань на панелі управління експериментом програми «Лабораторія ІТМ».

5. На досліджуваний зразок (кювету із суспензією), розміщену в центрі інтегруючої сфери, спрямовують зондуєче лазерне випромінювання. Розсіяне даним об'єктом випромінювання рівномірно розподіляється по внутрішній матовій поверхні сфери.

6. Для визначення інтенсивності розсіяного випромінювання в отворах сфери розміщують три оптичні датчики. Один датчик розміщують на оптичній осі лазера для реєстрації інтенсивності випромінювання, що пройшло через досліджуваний зразок суспензії ($I_{\text{посл}}$). Два інші оптичні датчики реєструють інтенсивність падаючого (зондуєчого) випромінювання (I_0) та відбитого зразком суспензії ($I_{\text{відб}}$).

7. Після того, як значення інтенсивності послабленого випромінювання ($I_{\text{посл}}$) не змінюється протягом 2 хв, вимірювання зупиняють.

8. Для опрацювання результатів вимірювання весь масив даних експортується у програму роботи з таблицями (кнопка «Експорт у Excel» у вікні програми «Лабораторія МІГ-1.3»).

9. З балансу енергії за формулою (4.12) визначають поглинуту енергію.

10. Одержані значення аналізують за допомогою програмного забезпечення, отримана функція описуватиме динаміку седиментації дисперсної системи.

11. Якщо експериментатор має на меті не лише визначити каламутність, а й оцінити швидкість седиментації дисперсної системи, тоді доцільно встановити математичну залежність показань світлового потоку датчика прямого світла у часі, але лише після математико-статистичної обробки цих показань та відкидання зон нерівномірності, обумовлених вмиканням-вимиканням лазера.

Приклад визначення динаміки седиментації дисперсної системи під час безперервного експерименту протягом 2 год наведено на рис. 4.6.

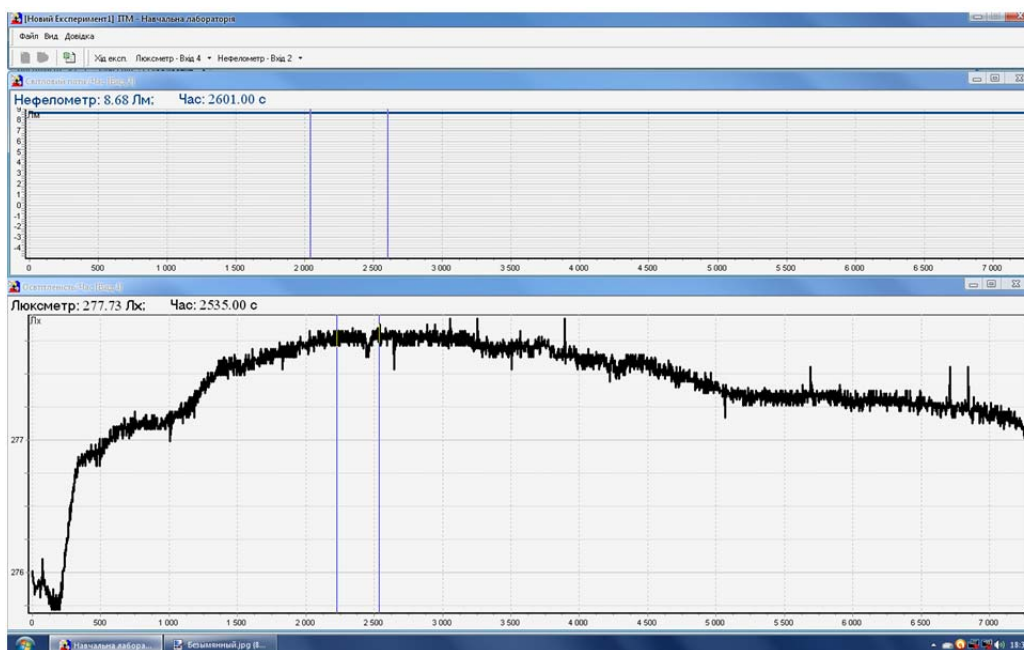


Рис. 4.6. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Приклад визначення динаміки седиментації дисперсної системи

Приклад визначення динаміки зміни інтенсивності забарвлення зразка розчину під дією світла наведено на рис. 4.7.

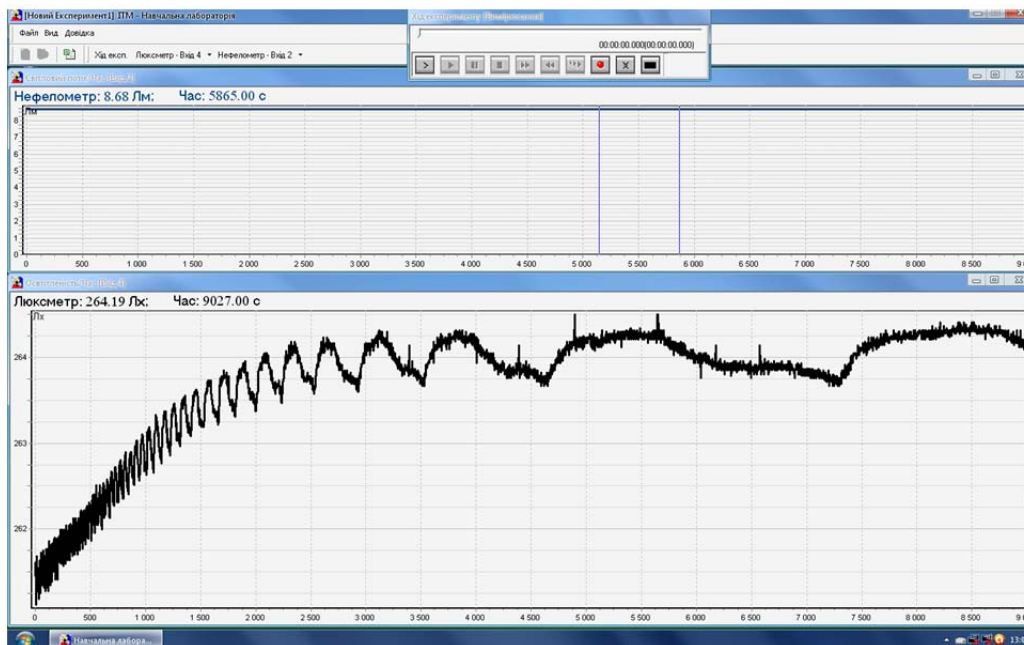


Рис. 4.7. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Приклад визначення динаміки зміни забарвлення розчину

Каламутність доцільно визначати із інтервалом висоти 5 мм за допомогою вимірювання частини затриманого монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі 660 нм на установці (рис. 4.6). Як оптичний датчик використовували цифровий люксметр із ціною поділки 0,05 Лх та діапазоном вимірювань $5 \dots 5 \times 10^4$ Лх. Отримані дані проходили попередню інструментальну фільтрацію із коефіцієнтом демпінгування «3» на програмному забезпеченні «Лабораторія МІГ-1.3».

Оскільки заливки рибних пресервів мають суттєво неоднорідні оптичні властивості на різній глибині, для проведення комплексу вимірювань градієнта каламутності було модернізовано згадану вище установку для визначення каламутності рибних бульйонів. Схему модернізованої установки наведено на рис. 4.8.

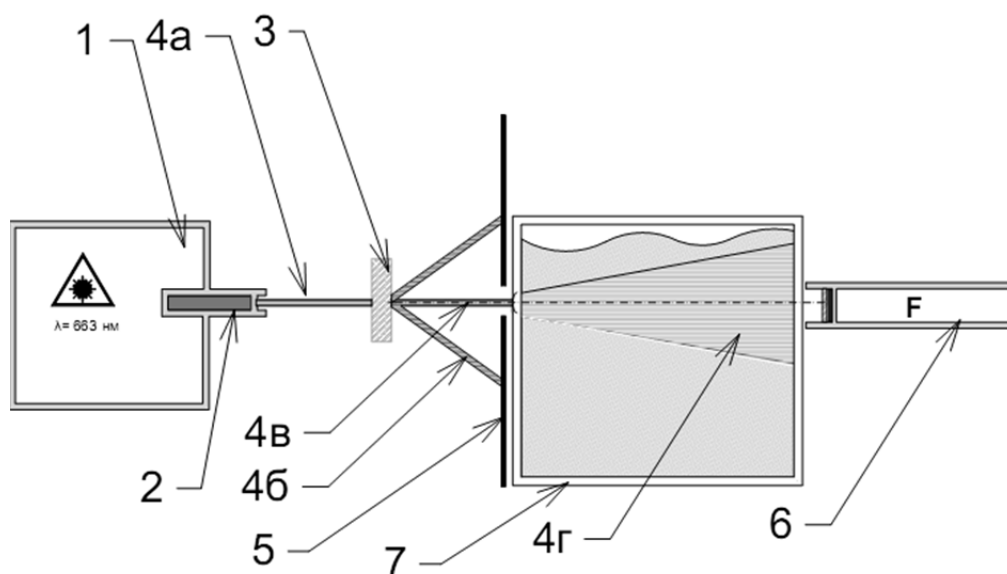


Рис. 4.8. Установка для визначення градієнта каламутності заливки рибних пресервів:

- 1) оптична лазерна установка ESPE-1; 2) лазерний випромінювач ЛГ 208 другого класу; 3) дифракційна ґратка 1:250; 4) лазерний промінь (4а – промінь до проходження дифракційної ґратки, 4б – промінь першого максимуму, 4в – промінь головного максимуму, 4г – конус розсіювання променя у досліджуваному зразку);
- 5) непрозорий екран; 6) оптичний датчик;
- 7) кювета з досліджуваним зразком

Інтенсивність світлового потоку визначалася за формулами (4.13) та (4.14). Для прозорих фракцій продукту із застосуванням дифракційної ґратки:

$$I = \frac{J}{\pi \cdot r^2}, \quad (4.13)$$

де I – інтенсивність світлового потоку, Лм;

J – рівень освітленості датчика люксметра, Лх;

R – радіус основи конуса розсіювання лазерного променя, мм;

r – радіус датчика люксметра, мм.

Для фракцій із великою оптичною густиною (без застосування дифракційної ґратки):

$$I = \int_r^R \frac{dJ}{dR}. \quad (4.14)$$

На рис. 4.9 наведено фотографії кювети із досліджуваними зразками заливки. Зразки фотографували в темряві без використання фотоспалаху та додаткової підсвітки за допомогою функції інфрачервоної та комбінованої зйомки на відеокамеру Sony DCR-SR45.

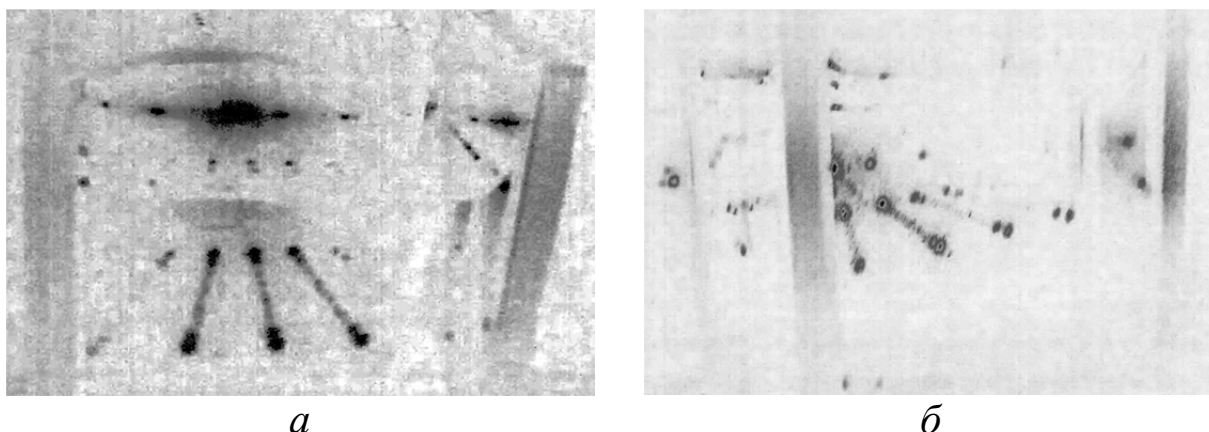


Рис. 4.9. Кювети з досліджуваними зразками під час проходження лазерного променя (інфрачервоні інвертовані фотографії):

а – прозора заливка через дифракційну ґратку,

б – каламутна заливка через дифракційну ґратку

Приклад результатів визначення швидкості седиментації окремих частинок дисперсної системи наведено на рис. 4.10.

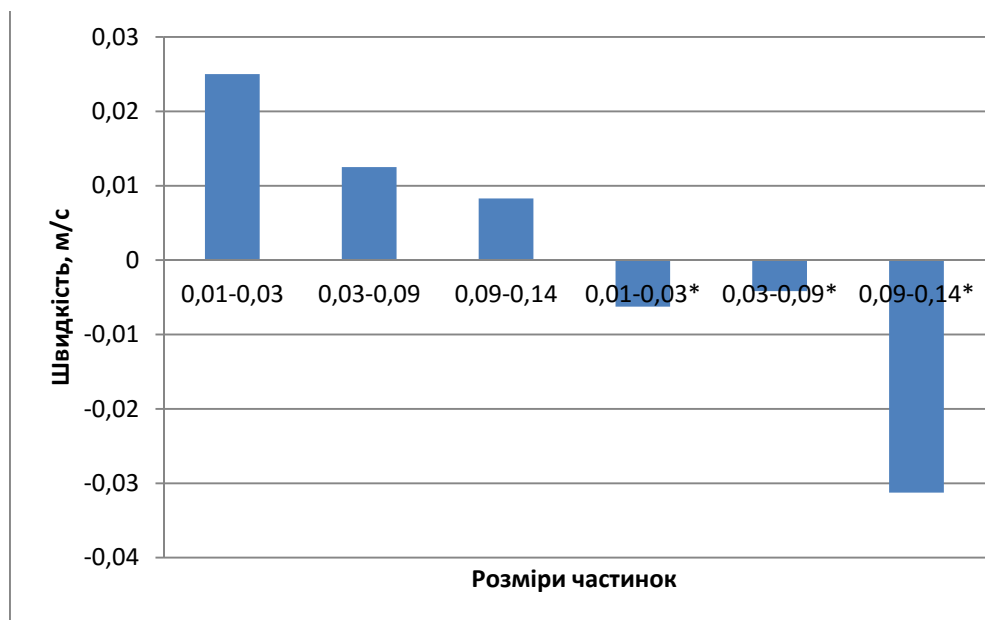


Рис. 4.10. Результати дослідження швидкості седиментації окремих фракцій частинок

Отже, розроблений метод визначення швидкості седиментації дисперсних систем дозволяє отримувати моделі динаміки осідання окремих фракцій частинок.

Також перспективним є застосування методу в освітньому процесі, оскільки це дозволить наочно продемонструвати студентам явища, що відбуваються в дисперсних системах від моменту припинення механічної дії (перемішування) до припинення седиментації великих частинок.

4.3. Визначення прозорості желевної продукції

Найбільш поширені методи оцінки прозорості желевної продукції – сенсорні. Проте вони ґрунтуються на первинному суб'єктивному сприйнятті відчуттів запаху, смаку, зору, дотику. Тому для підвищення об'єктивності і можливості оцінювання не лише готових продуктів, але і напівфабрикатів необхідно застосовувати фізичні методи дослідження.

За здатністю харчових продуктів змінювати напрямок поширення світлового потоку, що характеризується коефіцієнтом заломлення, можна визначати показник прозорості або каламутності желеподібних харчових продуктів з метою оцінювання їхньої якості та можливості зберігання.

Прозорість (каламутність) колоїдних розчинів, емульсій, суспензій визначається у прохідному світлі, тобто проба повинна міститися між оком спостерігача і джерелом світла.

Допустима кількість завислих часток може коливатися в широких межах, тому при виготовленні рідких фракцій необхідно контролювати параметр каламутності як складову показників консистенції та зовнішнього вигляду продукту. Проте не всі технологічні лінії мають навіть теоретичну можливість встановлення модуля контролю каламутності заливки [87]. Тому виробники контролюють оптичні властивості переважно органолептично.

Каламутність желеподібних утворень за допомогою нефелометра не визначають, оскільки, як вже зазначалося раніше, неможливо точно відкалібрувати прилад.

Запропоновано визначати каламутність методом вимірювання частки затриманого монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі 663 нм [81].

Якщо як оптичний датчик використовували цифровий люксметр із ціною поділки 0,05 Лх та діапазоном вимірювань $5 \dots 5 \times 10^4$ Лх, то отримані дані можуть проходити попередню інструментальну фільтрацію на програмному забезпеченні «Лабораторія МІГ-1.3».

Основна мета розробки – удосконалення методів оцінювання якості желеподібних харчових продуктів, зокрема структуроутворювачів, на основі харчових бульйонів.

Розроблений спосіб дозволяє визначити каламутність желеподібних структур шляхом врахування неоднорідності геометричних розмірів зразка та коефіцієнта відбивання не скла, а конкретного зразка. Установка для визначення прозорості желейних систем (рис. 4.11) значно простіша від інших, що використовуються для дослідження оптичних параметрів продуктів.

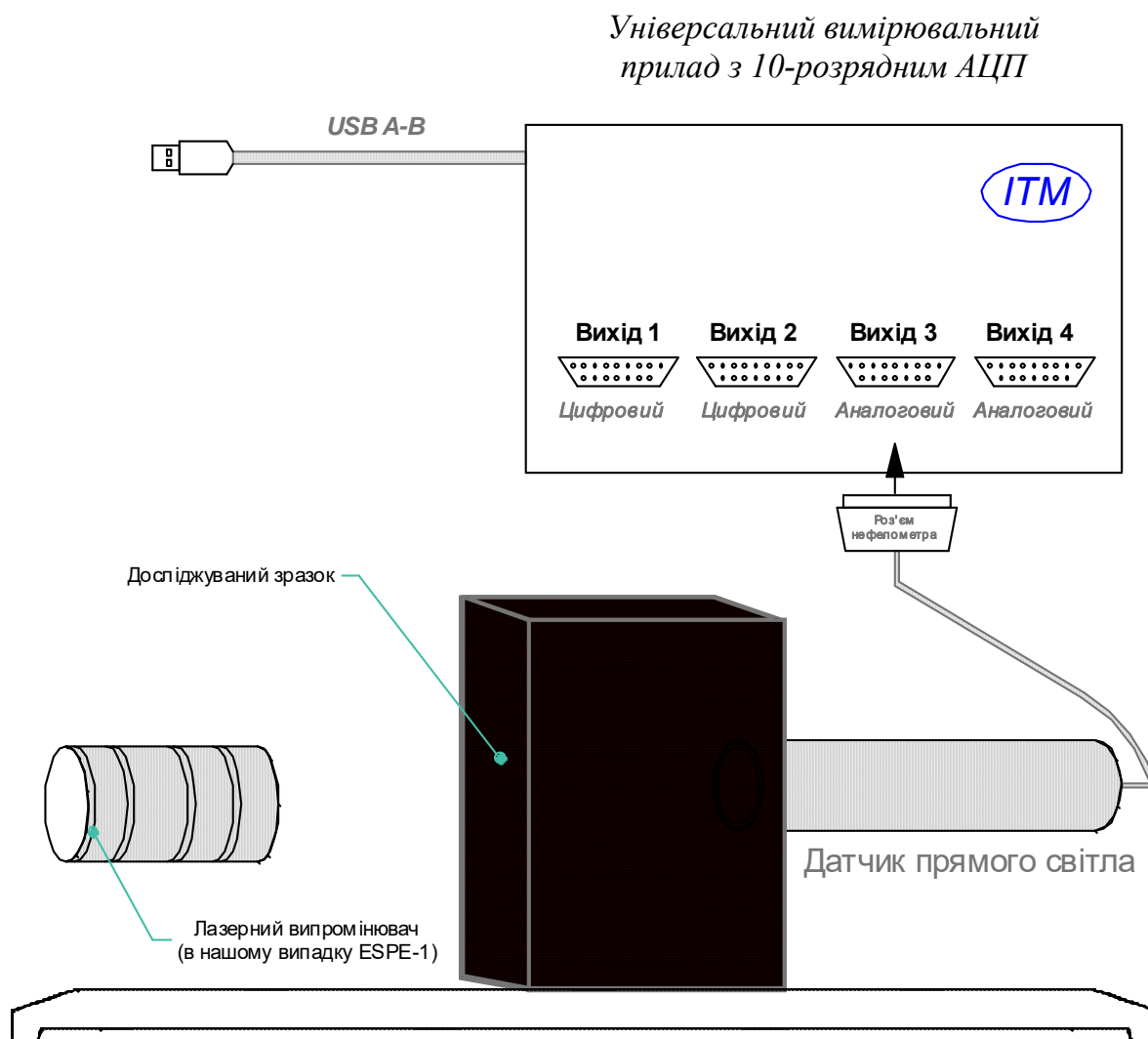


Рис. 4.11. Схема установки для визначення прозорості желейних систем

Переваги запропонованого методу полягають у тому, що, по-перше, існує можливість визначення каламутності бульйону на певній глибині; по-друге, застосовуються когерентні монохроматичні хвилі товщиною 660 нм, що значно розширює межі вимірювання каламутності; по-третє, відсутній вплив відбивальної властивості кювети на результати досліджень, що підвищує точність вимірювання.

Приклад отриманих емпіричних даних визначення каламутності наведено на рис. 4.12.



Рис. 4.12. Вікно програми «Лабораторія МІГ-1.3». Приклад визначення прозорості желейних систем

Інтенсивність світлового потоку визначається за формулою (4.13) у випадку, коли радіус основи конуса розсіювання лазерного променя менше радіуса датчика люксметра, та за формулою (4.15) у випадку, коли радіус основи конуса розсіювання лазерного променя більше радіуса датчика люксметра:

$$I = \int_r^R \frac{dJ}{dR}, \quad (4.15)$$

де I – інтенсивність світлового потоку, Лм;

J – рівень освітленості датчика люксметра, Лх;

R – радіус основи конуса розсіювання лазерного променя, мм;

r – радіус датчика люксметра, мм.

Коефіцієнт екстинкції (послаблення) світлового потоку визначається за формулою:

$$t_{зр} = \frac{1}{d_{зразка}} \ln \frac{I_1 - I_0}{I_{зразка} - I_0}, \quad (4.16)$$

де t – коефіцієнт екстинкції, мм^{-1} ;

I_0 – інтенсивність світлового потоку в камері без увімкненого лазера, Лм;

I_1 – інтенсивність світлового потоку при увімкненому лазері, Лм;

$I_{зразка}$ – інтенсивність світлового потоку після проходження зразка, Лм;

$d_{зразка}$ – товщина зразка, мм.

Каламутність желейної продукції визначається за формулою:

$$S = k \cdot t_{зр}, \quad (4.17)$$

де S – каламутність желейної продукції;

k – коефіцієнт перерахунку, який дорівнює для FNU – $162,43 \text{ FNU} \cdot \text{мм}$, для мг/л каоліну – $2,11 \cdot 10^{-2} \text{ г/м}$.

Приклад розрахунків визначення коефіцієнтів екстинкції світлового випромінювання та каламутності наведено в табл. 4.1.

Запропонований спосіб визначення прозорості харчових продуктів сприяє удосконаленню методів комплексного оцінювання якості та терміну зберігання желеподібних продуктів і напівфабрикатів у кореляційній залежності від інтенсивності світлового потоку та функціонально-технологічних властивостей продукту.

Таблиця 4.1

**Розрахунок коефіцієнтів екстинкції та каламутності
желейної продукції**

№ досліджу	Товщина зразка, мм		Світловий потік, Лм	
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 1	Зразок 2
1	17	32	0,67	0,2
2	14	31	0,62	0,19
3	11	29	0,69	0,22
Середнє	14	30,667	0,660	0,203
Результати дослідження каламутності:				
	Світловий потік лазера, Лм		1,29	
	Світловий потік без зразка, Лм		0,001	
	Площа оптичного датчика, м ²		0,000238	
Коефіцієнт послаблення, зразок 1		$t1=$	0,020811964	мм ⁻¹
Коефіцієнт послаблення, зразок 2		$t2=$	0,02622344	мм ⁻¹

Перспективами подальших досліджень є встановлення залежностей каламутності від співвідношення водорозчинної і жиророзчинної фракцій, температури заливки та терміну зберігання, а також створення комплексної математичної моделі, яка прогнозуватиме оптичні властивості рідкої фракції продуктів за комплексом технологічних та товарознавчих параметрів.

Розділ 5

БУДОВА, КОМПЛЕКТАЦІЯ ТА ПРИНЦИП РОБОТИ МОДУЛЯ «ТЕПЛОТА» ПРИЛАДУ МІГ-1.3

5.1. Теоретико-методологічні основи дослідження теплофізичних характеристик сировини та матеріалів

Теоретичні основи визначення теплофізичних характеристик сировини та матеріалів базується на теорії проникнення теплового поля у вигляді сферичної хвилі в досліджуваний об'єкт. При такому проникненні необхідно розглядати характер передавання теплової енергії молекулярними системами. Під час передавання теплової енергії за принципом Гюйгенса–Френеля хвиля передаватиметься генеруванням вторинних хвиль. Щоб визначити швидкість проникнення поля, використовують критерій Фур'є, а швидкість розсіювання поля в тілі визначають за критерієм Біо [51].

Теплофізичні властивості різних харчових матеріалів описуються загальними законами теплофізики. Основні теплофізичні характеристики – теплорівдність, теплоємність і коефіцієнт теплопровідності, розраховуються теоретично за формулами, проте здебільшого визначаються експериментально.

Харчові продукти мають властивості колоїдних капілярно-пористих тіл (тісто, хліб, зерно, кондитерські вироби та ін.), властивості колоїдних тіл (гідрофільних у вигляді розчинів, гелів і холодців) і властивості кристалічних тіл (цукор, сіль).

Сировина при переробці в кінцеві продукти піддається різним процесам: охолодження, нагрівання, варіння, обсмажування, сушіння, зволоження, механічна обробка, вплив сильних електричних полів і різних випромінювань: інфрачервоного, полів СВЧ, ультрафіолетового. Проникнення будь-якого поля в речовину зумовлює деформацію. Тому структурно-механічні властивості тісно пов'язані з теплофізичними

не лише теоретичними основами, а й наслідками. Виникнення термопластичності описано в розділі 3.

За величиною молекулярних сил зчеплення всі тіла поділяють на дві групи: тіла, які володіють малою молекулярною концентрацією – малими молекулярними силами зчеплення (пари і газ), і тіла, які володіють значними силами молекулярного зчеплення (рідини і тверді тіла). У рідких і твердих тіл сили молекулярного зчеплення приблизно однакові, і відмінність між твердим тілом і рідиною визначається дальнім або ближнім порядком розташування структурних осередків (атомів, йонів, молекул). Для пояснення характеру поведінки харчового продукту і створення фізичної моделі теплового процесу для реальних молекулярних структур використовують теорію Ван-дер-Ваальса, завдяки якій враховують і молекулярний розмір, і об'єм, і тиск, який чинить молекулярна структура при зміні температури (враховуючи, що температура є мірою середньої кінетичної енергії руху молекул) [51].

Загалом харчові продукти поділяють на тверді і рідкі чисто умовно, так як процеси, що протікають в них, відбуваються зі зміною агрегатного стану всього тіла або окремих його складових (перехід рідини в пару, конденсація пари в рідину, кристалізація, сублімація тощо). Особливо чітко це виявляється при охолодженні харчових продуктів. Крім того, експериментально фіксуються фазові переходи, за якими чітко можна констатувати наявність конкретних харчових компонентів [89].

Для характеристики теплових властивостей харчових матеріалів використовують загальні закони теплопровідності. Лінійна залежність між тепловим потоком і температурним градієнтом виражається відомим законом теплопровідності Фур'є у вигляді:

$$q = -\lambda \text{grad} T, \quad (5.1)$$

де q – густина теплового потоку, Вт/м²;
 λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · К);
 $\text{grad} T$ – температурний градієнт, К/м.

У законі Фур'є мінус означає, що в напрямку потоку тепла температура зменшується, а коефіцієнт теплопровідності характеризує здатність тіла проводити тепло.

Для харчових матеріалів різної структури механізм передавання тепла різний, чисельно коефіцієнт теплопровідності дорівнює кількості тепла, що проходить через одиницю площі ізотермічної поверхні при температурному градієнті, рівному одиниці.

Коефіцієнт теплопровідності залежить від тиску (при сублімації), температури і вологості, а для дисперсних матеріалів (типу борошна, зерна, цукру-піску) – від розмірів частинок, пористості, насипної густини, додаткового конвективного перенесення тепла і променевого теплообміну в порах. Можна вважати, що для дисперсних харчових матеріалів коефіцієнт теплопровідності є величиною умовною (вводиться поняття ефективного коефіцієнта теплопровідності, на відміну від істинного λ). Закон Фур'є справедливий тільки для стаціонарного температурного поля за умови, що:

$$T = f(x, y, z), \text{ а } \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0, \quad (5.2)$$

де $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ – швидкість зміни температури, К/с.

Якщо температура (T) харчового продукту є функцією координат і часу – температурне поле – нестационарне: $T = f(x, y, z)$, то для визначення температурного поля в будь-який момент часу в будь-якій точці потрібно розв'язати диференціальне рівняння теплопровідності із врахуванням крайових умов [90].

Диференціальне рівняння теплопровідності в об'ємі тіла має вигляд:

$$-\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 T, \quad (5.3)$$

де $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – другий диференціальний оператор Лапласа;

a – коефіцієнт температуропровідності ($\text{м}^2/\text{с}$), що характеризує теплоінерційні властивості харчових об'єктів і визначається за формулою:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (5.4)$$

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

ρ – густина матеріалу, кг/м³.

Величину $c\rho$ називають об'ємною теплоємністю матеріалу і вимірюють у Дж/(м³·К).

Коефіцієнт температуропровідності характеризує швидкість вирівнювання температури (просування ізотерми) в різних точках температурного поля. При інших рівних умовах швидше нагрівається або охолоджується тіло, що має велику температуропровідність [91].

Інтенсивність зміни температури тіла при його нагріванні чи охолодженні характеризує теплоємність тіла. Питома теплоємність (c) називають величину, що визначається кількістю тепла, необхідного для нагрівання одиниці маси речовини на один градус.

Всі три коефіцієнти λ , a і c є теплофізичними характеристиками матеріалу (ТФХ).

При наявності джерел тепла всередині харчового матеріалу – позитивних (наприклад, конденсація вологи, твердіння жиру) або негативних (наприклад, випаровування) – диференціальне рівняння теплопровідності набуде вигляду:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a\nabla^2 T + \frac{q_n}{c\rho}, \quad (5.5)$$

де q_n – кількість теплоти, що виділяється (або поглинається) щосекундно одиницею об'єму тіла, Вт/м².

На вирішення диференціального рівняння теплопровідності при різних крайових умовах базується велика частина експериментальних методів визначення теплофізичних характеристик харчових матеріалів у різних технологічних процесах харчової промисловості. Для харчових матеріалів при виборі методу визначення теплофізичних характеристик слід приймати крайові умови, що відповідають характеру тепло- і масообміну в даному процесі, а також враховувати різні форми зв'язку вологи з матеріалом.

Беручи до уваги теоретичний розрахунок коефіцієнта теплопровідності діелектриків, можна зробити висновок, що коефіцієнт теплопровідності λ пропорційний довжині релаксації енергії l_e . Система в процесі релаксації проходить різні стани, поступово наближаючись до стану теплової рівноваги.

Згідно з молекулярно-кінетичною теорією теплопровідність обумовлена перенесенням енергії мікрочастинками під впливом температурного градієнта, а для вологого матеріалу процес ускладнюється через вологість [92].

У класичній молекулярно-кінетичній теорії молярну теплоємність тіла визначають як першу похідну внутрішньої енергії тіла за абсолютною температурою [51]:

$$C = \frac{dU}{dT}, \quad (5.6)$$

де dU – зміна внутрішньої енергії тіла, Дж;

dT – зміна температури, К.

Під внутрішньою енергією U розуміють сукупність кінетичної енергії поступального, обертального і коливального руху мікрочастинок, потенційної енергії, обумовленої силами взаємодії мікрочастинок, і енергії випромінювання (всіх діапазонів частот). При цьому враховується взаємний вплив мікрочастинок і квазічастинок одна на одну [93].

У твердому харчовому матеріалі теплоємність залежить від структури матеріалу. Під час структурних змін (плавлення,

випаровування) порушується характер температурної залежності теплоємності. Відмінність графічної залежності від ефективної та істинної теплоємності дозволяє виявити фазові переходи і визначити тепловий ефект, якщо фазовий перехід супроводжується зміною внутрішньої енергії.

Теплоємність рідких харчових матеріалів органічного походження визначається за тими ж законами, що і для твердих тіл, з урахуванням специфіки їх будови.

У більшості рідких харчових матеріалів з підвищенням температури теплоємність збільшується, а у деяких – зменшується, наприклад у води.

Ф.М. Кам'я використовував імпульсне рівняння для вирішення складних задач теплопровідності за допомогою ЕОМ з метою розроблення методу, придатного для вирішення будь-якої теплової задачі [94].

У книзі Ф.М. Кам'я викладено імпульсну теорію теплопровідності і дані перетворення загальної вектор-задачі для введення в ЕОМ, а також показано, що за допомогою ЕОМ можуть вирішуватися задачі про наявність фазового переходу.

Коефіцієнт температуропровідності (a) харчових матеріалів є основною тепловою характеристикою і визначається експериментально або розраховується, якщо відомі коефіцієнти теплопровідності (λ), теплоємності (c) і густини (ρ) матеріалу за відомою формулою:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (5.7)$$

Для харчових матеріалів у кожному окремому випадку залежно від вологості, температури, густини, пористості, жирності та інших властивостей матеріалу можуть змінюватися значення коефіцієнта температуропровідності.

Докладні дані з їх характеристикою для різних харчових матеріалів систематизовано М.А. Громовим [95]. За його даними, для круп коефіцієнт температуропровідності із збільшенням вологості, температури і насипної маси зменшується,

водночас для меду з підвищенням температури температуропровідність (α) зменшується, а з підвищенням вологості – збільшується. Цими прикладами підтверджується необхідність індивідуальної оцінки теплоінерційних властивостей кожного харчового продукту.

Проведено огляд наукометричних баз даних з теми математичного моделювання теплових процесів, які протікають у продуктах харчування різних агрегатних станів і концентрацій. Так, у роботі науковців D.T. Constenla, J.E. Lozano, G.H. Scapiste описано математичну модель зміни теплофізичних властивостей очищеного яблучного соку від температури та концентрації. Також проведено дослідження залежності густини, в'язкості, теплоємності і теплопровідності очищеного яблучного соку від концентрації і температури та їх вплив на теплофізичні властивості об'єкта [96].

5.2. Фазові переходи та їхній вплив на теплофізичні характеристики харчових продуктів

Фазовим переходом називається фізичне явище, яке полягає у перебудові структури речовини і супроводжується виділенням або поглинанням енергії або зміні впорядкованості в кристалічній решітці без розриву значення ентропії S та обсягу V речовини.

Термодинамічне визначення фазових переходів пов'язує характер їх протікання з термодинамічними параметрами p , V , T , зі зміною ентропії системи dS , теплоємностями (C_p і C_v).

Харчові матеріали можуть перебувати в декількох фазах, зберігаючи твердий або рідкий стан, але їхні складові компоненти можуть переходити з одного агрегатного стану в інший (наприклад, перехід льоду в пар при сублімаційному сушінні, коли форма і розміри висушеного продукту зберігаються, випаровування з вільної поверхні при нагріві та ін.). Харчові матеріали мають зв'язок з вологою різних форм і технологічні процеси можуть супроводжуватися фазовими переходами, як правило, першого роду.

Фазовим переходом першого роду називається такий перехід речовини з однієї фази в іншу, що супроводжується фундаментальною перебудовою структури речовини (перехід на молекулярному рівні ближнього порядку в дальній і навпаки). Цей перехід супроводжує зміна обсягу, в'язкості та інших характеристик. При фазовому переході першого роду ентропія (S) й обсяг (V) змінюються стрибкоподібно.

Такі переходи обов'язково супроводжуються поглинанням або виділенням енергії у формі питомої теплоти плавлення, твердіння, кристалізації, випаровування, конденсації і т. д. [97]

Ця теплота фазового переходу характеризує стрибкоподібну зміну ентропії системи, теплоємність речовини, при цьому перехід має нескінченно велику величину:

$$C_v = T \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right) \rightarrow \infty. \quad (5.8)$$

Тому для правильного розрахунку теплоємності слід визначити питому теплоту фазового переходу і зменшити на цю величину значення теплоємності.

У фізиці під питомою теплоємністю розуміють тільки ту кількість тепла, що необхідно для нагрівання одиниці маси речовини на один градус.

Під питомою (іноді її називають прихованою) теплотою фазового переходу розуміють ту кількість тепла, яку необхідно підвести до речовини, щоб при даній температурі фазового переходу (плавлення, випаровування, кипіння) одиницю маси речовини перевести з твердої фази в рідку, з рідкої – в пароподібну. При твердінні речовини або компонента, кристалізації, конденсації, навпаки, речовина – харчовий матеріал виділяє питому теплоту фазового переходу і питома теплоємність, відповідно, зменшується на цю величину, а теплоємність впливає на теплопровідність (λ) і температуропровідність (a), так як три теплофізичні характеристики пов'язані рівнянням:

$$\lambda = a\rho, \quad (5.9)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м^3 .

Можливі помилки в експериментальному визначенні теплоємності харчових матеріалів при наявності фазових переходів і вплив цих помилок на інші характеристики. Експериментальне визначення теплофізичних характеристик – це тільки вузька сфера теплофізики, в якій фазові переходи чинять істотний вплив на визначені величини λ , a і c , особливо на їхню залежність від температури, вологості та інших параметрів.

У лабораторії фізики кафедри інженерно-технічних дисциплін КНТЕУ було отримано графічні залежності коефіцієнтів теплопровідності і теплоємності різних харчових продуктів за допомогою вимірювального модуля МІГ-1.3 як під час нагрівання, так і охолодження досліджуваних об'єктів [4].

Найбільш характерний аномальний вплив фазових переходів на теплофізичні властивості харчових матеріалів простежується при дослідженні молока, вершків, молочного жиру, сироватки.

На основі експериментального матеріалу М.А. Громов [95] вказує на неточності у значеннях теплоємностей молочних продуктів і доводить, що теплоємність знежиреного та незбираного молока не залежить від температури. Експериментальні дані показують, що теплоємність вершків аномально зростає.

Відношення теплопровідності твердої фази до теплопровідності рідкої фази можна розглядати як критерій інерційності фазового переходу. Цей критерій є функцією температури і концентрації розчину. Чим вище швидкість заморожування, тим менша інерційність фазового переходу і тим вище стрибок відношення $\lambda_{тв}/\lambda_{ж}$. Максимум критерію зміщений у бік малих концентрацій.

До фазових переходів першого роду належить процес випаровування рідини, властивий багатьом технологічним

процесам: випіканню, сушінню, нагріванню тощо. Температура зразка залишається постійною, що дорівнює температурі випаровування ($T_{\text{вип}}$) до тих пір, поки вся рідина не випарується за рахунок підведеної теплоти. Тому при гідротермічній обробці харчових продуктів із властивостями капілярно-пористих тіл всередині капілярів відбувається фазовий перехід – випаровування. Температура випаровування залежить від тиску і характеризується рівнянням Клаузиуса–Клапейрона у вигляді:

$$\frac{dT_{\text{вип}}}{dp} = \frac{T_{\text{вип}}}{\nu r_{\text{вип}}} (V_{\text{газ}} - V_{\text{рід}}), \quad (5.10)$$

де ν – число моль;

$r_{\text{вип}}$ – питома теплота випаровування 1 моля, Дж/кг;

$V_{\text{рід}}$ – об'єм речовини в рідкому вигляді, м³;

$V_{\text{газ}}$ – об'єм речовини в газоподібному стані після випаровування при $T_{\text{вип}}$ і p , м³.

При цьому $V_{\text{газ}} \gg V_{\text{рід}}$ питома теплота пароутворення в десятки разів більше теплоти плавлення, так як теплова енергія витрачається на розрив міжмолекулярних зв'язків молекул рідини і на переміщення їх у більшому просторі. Процеси, що супроводжуються фазовими переходами, настільки складні, що без спеціальних досліджень неможливо побудувати їх фізичну теорію.

5.3. Використання математичного моделювання у теплофізичних дослідженнях

Математичне моделювання є одним із основних сучасних методів дослідження. Загалом під моделюванням розуміють процес дослідження реальної системи, що включає побудову моделі, її дослідження та перенесення отриманих результатів на досліджувану систему. Модель можна визначити як об'єкт,

що збігається із реальним і є лише засобом опису прогнозування його поведінки. Під математичним моделюванням розуміють сукупність співвідношень (формул, рівнянь, нерівностей, логічних умов, операторів тощо), які визначають характеристики станів системи залежно від її параметрів, зовнішніх умов (початкових умов, граничних умов і т.п.). Загалом, за визначенням В.М. Глушкова, математична модель – це множина символічних математичних об'єктів і співвідношень між ними. За М.М. Амосовим, математична модель – це система, що відображає іншу систему.

У теплофізиці широко використовується математичне моделювання. Всі закони і закономірності описані математичними формулами і функціями. Якщо ж процес є складним, то його протікання описується системою диференціальних рівнянь.

Типовими завданнями моделювання є пошук оптимальних чи наближених до оптимальних рішень, визначення властивостей системи; встановлення взаємозв'язків між її елементами або характеристиками, а також між характеристиками системи і зовнішнім середовищем.

Складні системи можна охарактеризувати функціями, що вони виконують (процесами, які відбуваються в них), структурою, а також поведінкою в часі. Відповідно, розрізняють функціональні, структурні, інформаційні та поведінкові моделі систем. Функціональна модель системи описує сукупність функцій, що їх виконує система (сукупність процесів, які відбуваються в ній), характеризує склад та взаємозв'язки її функціональних підсистем. Структурна модель відображає побудову системи; інформаційна – відношення між елементами системи, а також між системою і зовнішнім середовищем, встановлює взаємозв'язки між системами. Інформаційна модель теж може мати вигляд рівнянь регресії або кореляційних рівнянь, які відображають зв'язок між рядами даних, що надає статистичний опис процесу взаємодії між системами. Поведінкова модель відображає динаміку функціонування системи, зміни її станів, подій, що відбуваються в ній, тощо.

Розглянемо тверде тіло і процес теплопровідності, використовуючи попередньо розглянуту кваліфікацію моделей. Структурні моделі відображають будову речовини, тобто об'єкта дослідження. Структурну будову речовини розглядають з позицій просторового розміщення атомарно-молекулярної структури. Наприклад, для твердого кристалічного тіла це може бути кристал з уточненням системи симетрії просторової ґратки (проста, об'ємна, об'ємноцентрована система тощо). Доцільно розглядати пористі структури як сукупність трубок циліндричної форми, з'єднаних речовиною. Інформаційну модель застосовують для встановлення закономірностей і залежностей фізичних властивостей речовини (теплопровідності, питомої теплоємності, температуропровідності) від зовнішніх параметрів (температури, тиску, релаксаційної сили тощо). Встановлення різних взаємозв'язків від параметрів, отримання масиву даних, створення таблиць, побудова функціональних залежностей є інформаційними моделями. Прикладом поведінкової моделі можуть бути моделі зміни фізичних властивостей з часом, діаграми фазових перетворень і т. ін.

На сьогодні існує багато класифікацій математичних моделей. Зокрема, виділяють моделі статистичні та динамічні, диференціальні й інтегральні, лінійні та нелінійні, геометричні, імітаційні тощо. Найбільш поширеними формами запису математичних моделей є інваріантна, аналітична, алгоритмічна, графічна. У інваріантній формі моделі записують за допомогою алгебраїчних, диференціальних, інтегральних та інших рівнянь і нерівностей, без урахування методу подальшого аналізу моделі. Аналітична форма – це запис моделі у вигляді аналітичного розв'язання вихідних рівнянь інваріантної моделі, тобто послідовності операцій, що здійснюються під час такого дослідження. Моделі, записані у графічній формі, – це геометричні та топологічні об'єкти, схеми, графіки тощо.

Розвиток комп'ютерних технологій та програмного забезпечення надає змогу використовувати для аналітичних досліджень математичних моделей прикладні пакети

символічних обчислень, такі як Maple, Matlab, Махута, Reduce, що значно розширює можливість здійснення аналітичних досліджень. Принциповим недоліком обчислювальних методів з використанням програмного забезпечення є те, що за їх допомогою можна використовувати лише аналіз окремих частин дослідження. Тому отримані розв'язки не є повними. Вони характеризують поведінку та властивість досліджуваного об'єкта лише за конкретно зазначених умов, які чітко визначені і тому спрогнозувати поведінку досліджуваного об'єкта при зміні умов не можливо. Для отримання більш цілісної інформації щодо зміни теплофізичних характеристик досліджуваного об'єкта від температури чи під час деформації та створення в кінцевому випадку моделей установок для експрес-діагностики необхідно використовувати всі математичні моделі, описані вище.

Для дослідження математичних моделей, побудованих у вигляді диференціальних рівнянь та їх систем, застосовують також аналогове моделювання. У цьому випадку використовують аналогові електричні схеми, коливальні процеси яких описуються диференціальними рівняннями, що дозволить отримати розв'язки відповідних диференціальних рівнянь [98].

Під час дослідження складних систем застосовують методи, засновані на використанні аналогів – різних за змістом процесів, що описуються одними і тими самими математичними моделями.

Результати моделювання та прогнозування характеристик процесів холодильної обробки за цією методикою апробовані на різних об'єктах дослідження чисельними експериментальними даними представників наукової школи та даними експериментів інших дослідників. Отримані похибки моделювання експериментальних досліджень свідчать, що математична модель може використовуватися для прогнозування характеристик процесів із достовірністю очікуваних результатів у межах похибок, що вимагають технологічні регламенти виробничих процесів та складання бази даних для технологів, які реалізують процеси холодильної обробки, наприклад м'яса в напівтушах [99].

Ю.О. Желіба, С.В. Харченко, М.В. Оніщенко [100] провели теоретичні дослідження характеристик процесів охолодження м'яса яловичини в напівтушах, результати яких дозволили інформаційно забезпечити як спеціалістів-технологів та логістики, так і спеціалістів з програмування систем автоматизованого керування холодильним обладнанням відповідним авторським програмним забезпеченням.

Розробка нових методів розв'язання задач динаміки теплообмінних процесів, які дозволяють прогнозувати температурні поля під час нагрівання або охолодження харчових продуктів та сировини, а також розраховувати оптимальну тривалість процесу за технологічними вимогами, є найбільш перспективним напрямом досліджень. Як відомо, математична модель цих процесів представлена нестационарною крайовою задачею для рівняння Фур'є–Кіргофа. Точне аналітичне розв'язання такої задачі можливе для обмеженого числа тіл правильної геометричної форми за умов сталості теплофізичних характеристик. На сьогодні для вирішення крайових задач динаміки теплообміну тіл довільної геометричної форми застосовується ряд методів: метод кінцевих різниць, варіаційні методи, проєкційні методи [101]. Подальшим розвитком варіаційного методу є його доповнення методом R-функцій, який дозволяє враховувати складну геометричну форму розрахункової області або неоднорідність граничних умов на окремих ділянках межі області [102]. Але застосування цих методів на практиці потребує розробки спеціалізованого програмного забезпечення, яке принципово не може бути універсальним інструментом вирішення зазначених задач з огляду на різноманітну геометрію продуктів та види граничних умов у конкретних технологічних процесах. Тому у практиці інженерних розрахунків найчастіше використовуються відомі аналітичні розв'язання рівняння Фур'є–Кіргофа для низки тіл правильної геометричної форми. В.О. Потаповим, О.С. Сомовим [103] отримано наближене рішення динаміки процесу нагрівання (охолодження) тіл довільної форми в процесі конвекційного теплообміну, яке дозволяє розраховувати температурні поля та тривалість процесу.

В.В. Стариков [104] провів дослідження у сфері тепло- і масоперенесення в капілярно-пористих колоїдних матеріалах, розробив математичні моделі процесів термічної обробки у вигляді аналітичних розв'язків краєвих задач сучасного тепло- і масоперенесення. Отримана математична модель добре узгоджується з тепло-, масоперенесенням під час копчення рибних продуктів.

Дослідженню теплофізичних властивостей харчових продуктів присвячено роботи класиків теплотехніки А.С. Гінзбурга [95], Г.Б. Чиждова, М.А. Громова, І.А. Чубика, М.А. Маслова, G. Tchigeov, L. Riedel, С.Р. Lentz, але лише розвиток методів програмного моделювання наприкінці минулого століття дозволив не лише визначати теплофізичні властивості продуктів, а і створювати математичні моделі, що описують їх зміни. Так, у дослідженні С.Д. Шиловського [105] наведено алгоритм математичного моделювання теплофізичних властивостей тіл із складною геометрією поверхні. І хоча робота в цілому присвячена системам автоматичного регулювання із структурно-налаштовуваним алгоритмам, запропонований вченим метод обрахунку динамічної площі поверхні тіла використаний у цьому дослідженні.

Коллективом харківських вчених [105] визначено залежності коефіцієнта теплопровідності листкового тіста від його вологості та способу термічної обробки. Встановлено, що із збільшенням вологості тіста суттєво підвищується його теплопровідність. Випікання зразків однакової вологості, але різними способами дозволяє отримати готові вироби, що відрізняються вологістю, яка є визначальним фактором для коефіцієнта теплопровідності.

Таким чином, можна стверджувати, що наукові дослідження змін теплофізичних властивостей більшості харчових продуктів не враховують можливостей цифрових вимірювальних приладів та сучасного програмного забезпечення та не охоплюють теплофізичних властивостей продуктів, що містять харчові добавки.

5.4. Дослідження динаміки теплофізичних властивостей у процесі термічної обробки

Визначення теплопровідності харчових продуктів, особливо багатокомпонентних структур, є актуальним завданням сучасної теплофізики. Для вирішення цих питань застосовують два способи. Один із них – емпіричний з використанням феноменологічної теорії теплопровідності. Другим методом визначення теплопровідності харчових продуктів є експериментальний.

Швидкість теплового потоку всередині багат шарових продуктів під час термічної обробки залежить не лише від теплофізичних характеристик шару продукту, а й від хімічних реакцій, які відбуваються при доведенні продукту до готовності.

Важливим етапом розробки технології нових продуктів харчування є визначення їх теплофізичних властивостей та режимів термічної обробки.

На сьогодні визначення теплопровідності продукту є актуальним і одночасно складним процесом. Оскільки більшість харчових продуктів є неординарними для дослідження, тобто неоднорідними, їх не можна розглядати як тверде чи аморфне тіло, поверхня продукту не є гладкою, а тому площа тіла може бути оціненою лише наближено, бо реально її площа буде більшою.

Схеми установок для визначення теплофізичних властивостей наведені на рис. 5.1 та 5.2.

Важливим етапом розроблення технології обробки продуктів харчування є визначення теплофізичних властивостей та температурних градієнтів у дослідних зразках, а також обґрунтування режимів термічної обробки.

Для опрацювання даних використано типову теорію теплопровідності – тіло, яке перебуває в об'ємі зі сталою температурою, розглядається як таке, що перебуває в температурному полі. Відповідно, до визначення температурного поля в кожній точці простору температура однакова, а отже, розглядається ізотермічний процес.

Розділ 5. Будова, комплектація та принцип роботи модуля «Теплота» приладу МІГ-1.3

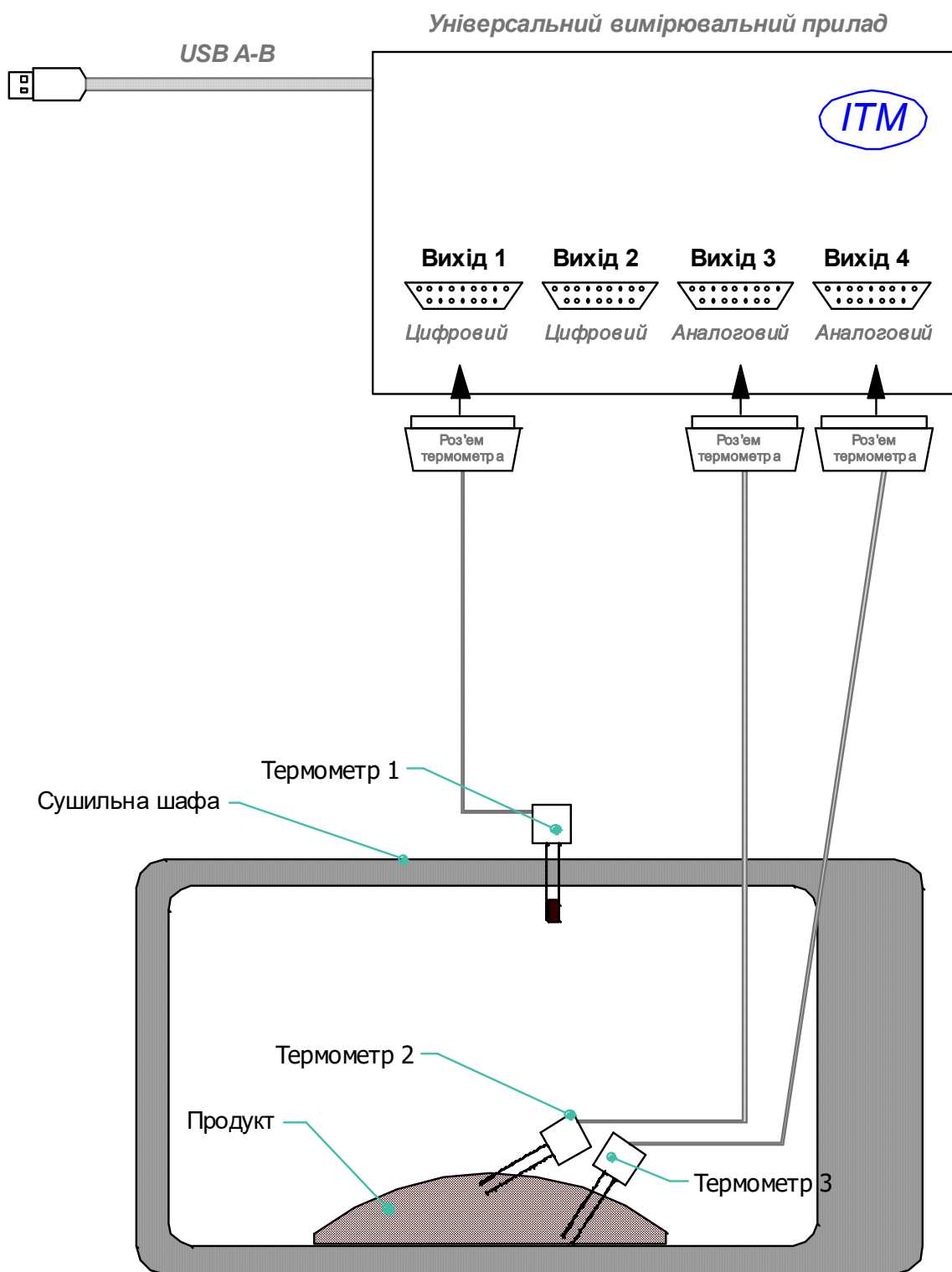


Рис. 5.1. Схема установки для визначення теплофізичних параметрів продуктів при нагріванні

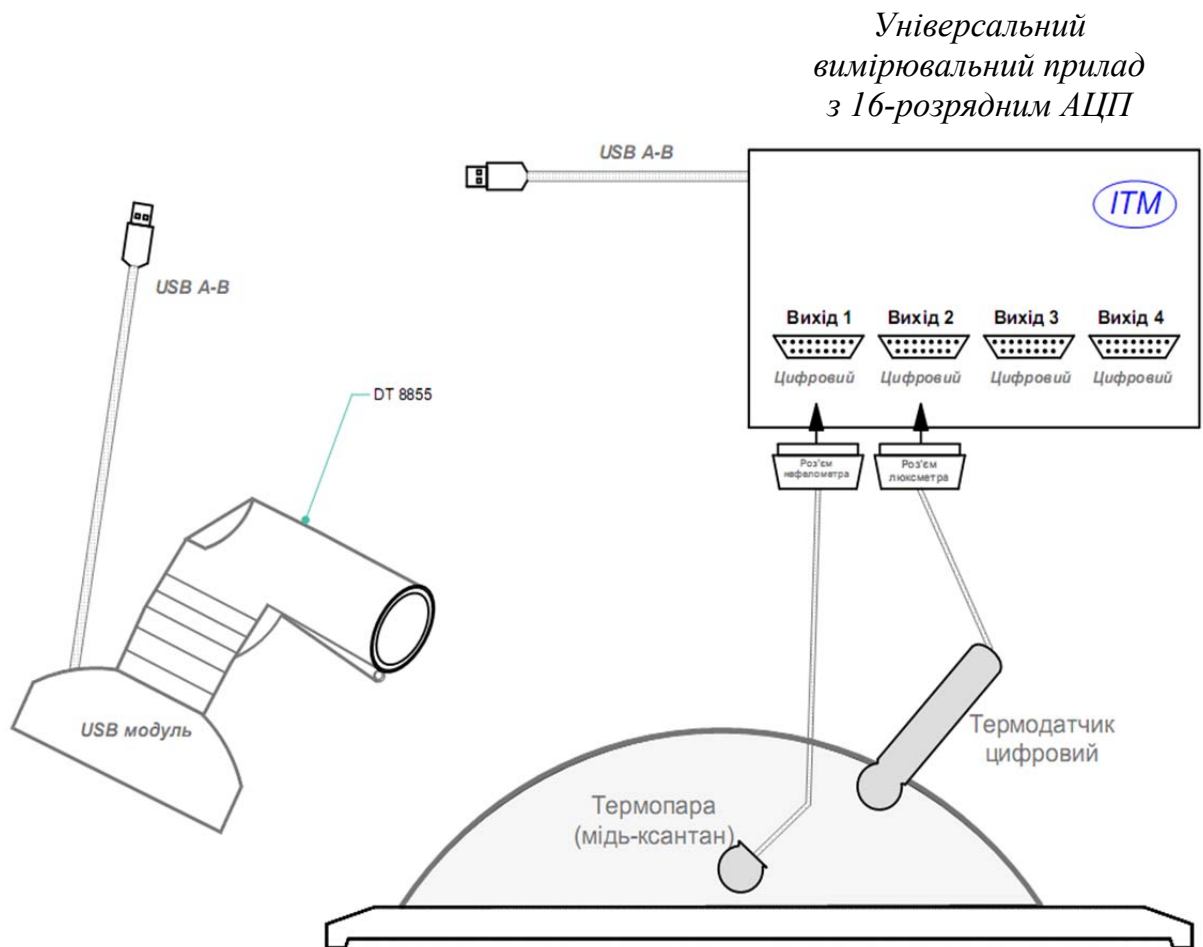


Рис. 5.2. Схема установки для визначення теплофізичних параметрів продуктів при охолодженні

У схемі установки для визначення теплофізичних параметрів продуктів при охолодженні для визначення температури поверхні використовується пірометр, адже навіть найменші датчики будуть фіксувати температуру лише під поверхнею зразків.

Фазовий перехід фіксується за величиною поглинутої або випроміненої прихованої теплової енергії; за різкою зміною об'єму, стрибком теплоємності, коефіцієнтом об'ємного розширення; зміною електроопору; зміною магнітних властивостей речовини; дифракційної картини тощо. У нашому випадку дослідження мали на меті виявити і зафіксувати стрибок коефіцієнта теплопровідності харчового продукту.

Використовуючи систему термопар, диференціальний манометр та універсальний вимірювальний комп'ютерний прилад (МІГ-1.3), розроблено систему датчиків для фіксування змін тиску всередині рідких продуктів у процесі термічної обробки (рис. 5.3, зображення установки наведено на рис. 5.4).

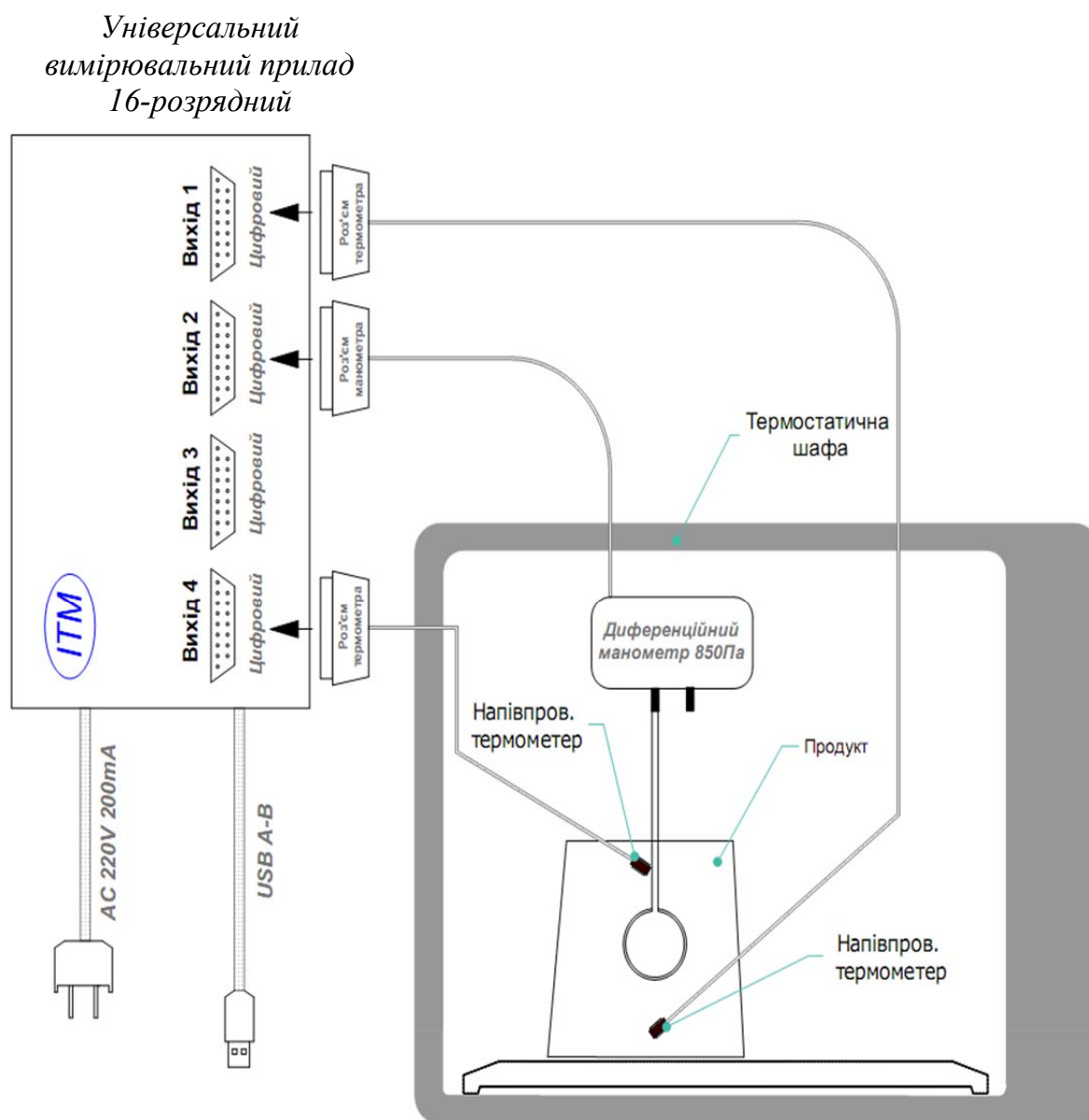


Рис. 5.3. Установка для визначення тиску всередині рідких продуктів у процесі термічної обробки

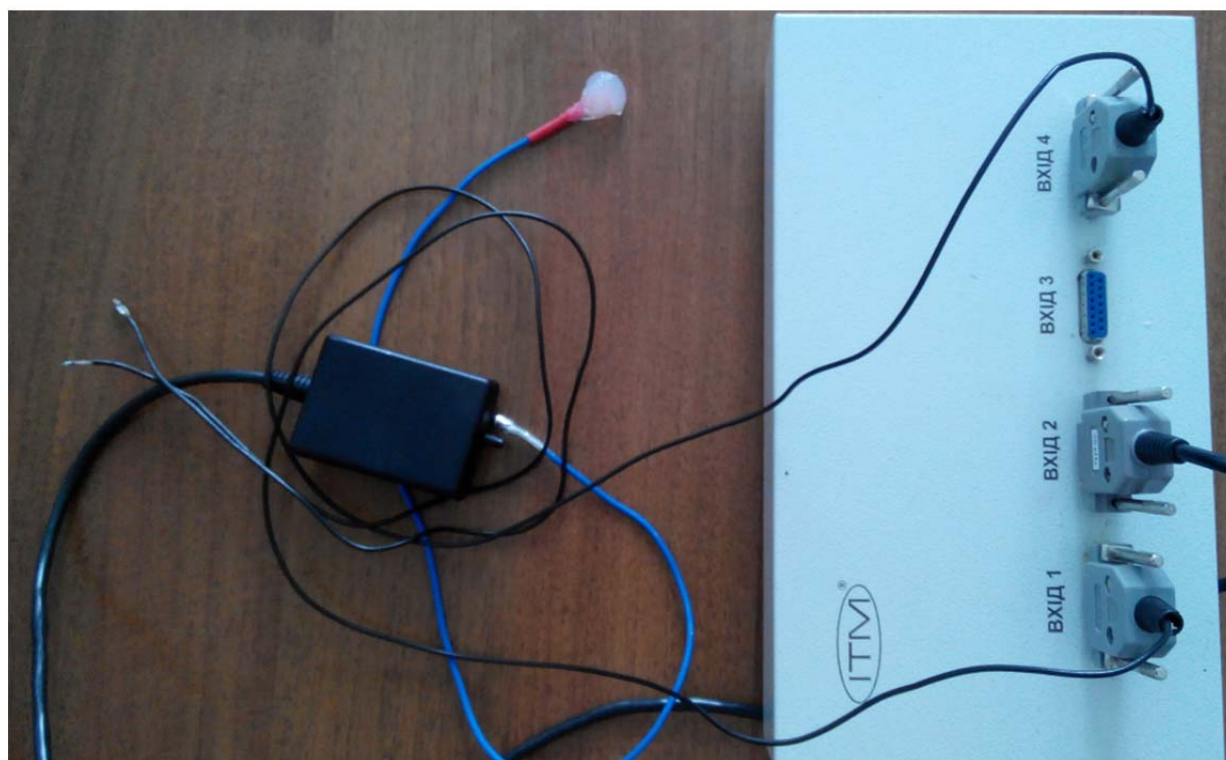


Рис. 5.4. Установка для визначення тиску всередині рідких продуктів у процесі термічної обробки

Таким чином, визначено, що зміна стабільності фаз і перехід речовини з однієї фази в іншу відбувається при певній конкретній температурі (T_0). Ця температура для кожного харчового продукту окрема і залежить від багатьох факторів: консистенції, кількості компонент, стану кожної компоненти, міжмолекулярного зв'язку компонент, наявності зв'язуючих елементів тощо. Тому для харчового продукту (T_0) це певна усереднена температура стану харчового продукту як системи. Розглядаючи в системі існування вільної енергії Гельмгольца, використовуючи коефіцієнт Гельмгольца, отримуємо умову виникнення фазового переходу між температурним проміжком від T до T_0 . Якщо $T < T_0$, при низьких температурах стабільна фаза I, якщо ж $T > T_0$, – фаза II. Для пояснення отриманих експериментальних даних використано теорію фазових переходів.

5.5. Дослідження взаємозв'язку теплофізичних та реологічних властивостей

У лабораторії фізики Київського національного торговельно-економічного університету проведено дослідження із встановлення зв'язку швидкості розповсюдження тепла і часу релаксації харчових продуктів. Як відомо, під час деформації харчових продуктів виконується механічна робота на стискання об'єктів дослідження.

Під час стискання в об'єкті виникають сили пружності, які виконують роботу з переміщення об'єкта в початковий стан – це і є час релаксації об'єкта. В результаті деформаційних дій над об'єктом температура самого об'єкта зростає. Оскільки температура є мірою середньої кінетичної енергії руху молекул і за нульовим началом термодинаміки – мірою теплоти, то логічно припустити, що під час деформації вивільнене тепло приводить до вивільнення частини зв'язаної вологи в об'єкті, а відповідно, цей факт свідчить про зміну не лише пружних властивостей об'єкта, а й про скорочення терміну зберігання об'єктів. Тому не всі харчові продукти можуть транспортуватися в розсипному пакуванні.

Скористаємося відомою формулою для визначення швидкості розповсюдження тепла в зразку:

$$v_r = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho\tau_r}}, \quad (5.11)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності харчового продукту;

c – теплоємність продукту;

ρ – густина продукту;

τ_r – час релаксації продукту.

За рівнянням рівнодійної сили визначаємо швидкість релаксації:

$$F_p = ma = m \frac{v_r - v_0}{\Delta t}, \quad (5.12)$$

$$v_0 = 0,$$

$$v_r = \frac{F_p \Delta t}{m}, \quad (5.13)$$

де F_p – рівнодійна сила (експериментальні значення);

m – маса тягарця (6,95 г);

v_0 – початкова релаксаційна швидкість зразка;

v_r – кінцева релаксаційна швидкість зразка;

Δt – час релаксації.

Визначимо коефіцієнт теплопровідності із отриманого співвідношення:

$$v_r = \frac{F_p \Delta t}{m} = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho\tau_r}}, \quad (5.14)$$

$$\lambda = \frac{F_r^2 \Delta t^2 c\rho\tau_r}{m^2} = v_r^2 c\rho\tau_r. \quad (5.15)$$

За отриманим виразом можна побудувати графічні залежності коефіцієнта теплопровідності від часу та температури релаксації.

Для проведення досліджень розроблено модель експериментальної установки, зображеної на рис. 5.5.

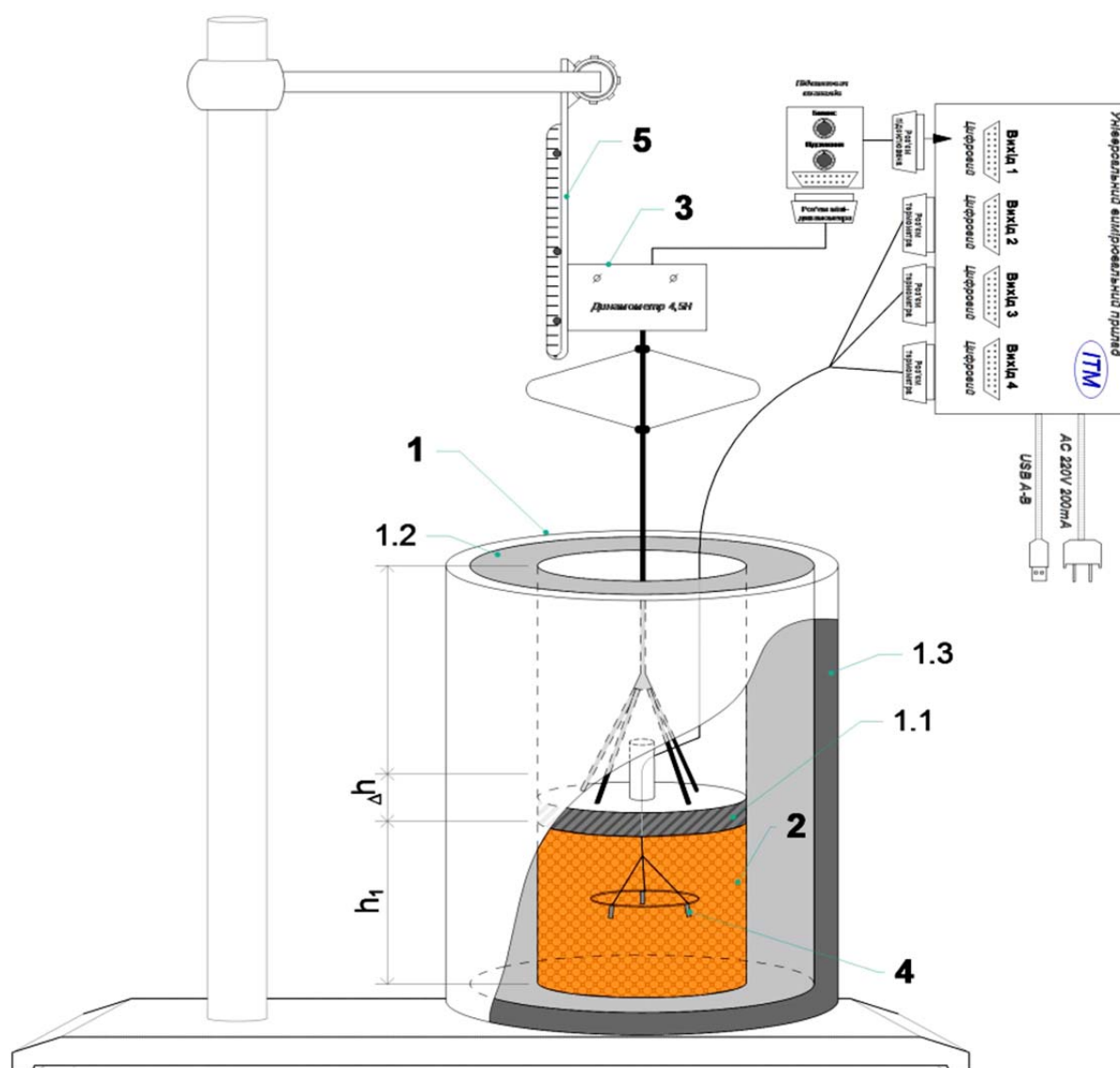


Рис. 5.5. Установка для досліджень релаксації харчових продуктів:
1 – циліндр (1.1 – поршень, 1.2 – ізоляція (пінопласт);
1.3 – зовнішній циліндр, виготовлений з пластику); 2 – досліджуваний зразок; 3 – динамометр; 4 – датчики; 5 – лінійка

Під час використання зазначеної установки досягається умова адіабатного стиснення чи адіабатного розширення, так як установка має відповідну термоізоляцію. Використовуючи перше начало термодинаміки, отримаємо умову, що зміна внутрішньої енергії зразка є наслідком виконання над зразком роботи з його стиснення. Робота зі стиснення – це механічна робота, яку можна розрахувати за формулою:

$$A = F\Delta h, \quad (5.16)$$

де F – рівнодійна сила, яка визначається динамометром (3) і експортується МІГ-1.3 до програми Ехсел, а переміщення (h) – за показами лінійки (5).

У результаті деформаційних дій зразок нагрівається і зміна температури у зразку фіксується системою датчиків (4). Кількість теплоти, що вивільняється у результаті деформації, розраховуємо за формулою:

$$Q = cm\Delta T, \quad (5.17)$$

де c – питома теплоємність зразка,

m – маса зразка,

ΔT – різниця температури між початковим і досліджуваним моментом часу.

За отриманим співвідношенням визначається швидкість релаксації:

$$c_{зр} m_{зр} \Delta T_{зр} = \frac{m v_r^2}{\Delta t}. \quad (5.18)$$

Отже,

$$v_r = \sqrt{\frac{c_{зр} m_{зр} \Delta T_{зр} \Delta t}{m}} = \sqrt{\frac{c_{зр} m_{зр} \Delta T_{зр} \tau_r g}{F}}. \quad (5.19)$$

Крім того, релаксаційна швидкість може бути визначена і з урахуванням теплофізичних властивостей зразка, тобто:

$$v_r = \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho\tau_r}}, \quad (5.20)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності харчового продукту;
 c – теплоємність продукту;
 ρ – густина продукту;
 τ_r – час релаксації продукту.

Порівнюючи отримані формули з визначення швидкості релаксації, отримуємо залежність коефіцієнта теплопровідності від сили деформації і часу релаксації. Тобто:

$$\lambda = \frac{c_{zp}^2 \rho_{zp} m_{zp} \Delta T_{zp} \tau_r^2 g}{F}. \quad (5.21)$$

За розрахунками будують функціональні залежності, отримують математичну модель процесу, яка лягла в основу розробки моделей обладнання для проведення експрес-діагностики харчових продуктів.

5.6. Визначення залежності межі міцності продукту від температури

Науковцями кафедри інженерно-технічних дисциплін КНТЕУ у співпраці з ТОВ «ІТМ» розроблено датчик оригінальної конструкції для комплексного визначення параметрів м'ясної сировини.

Суть розробки полягає в тому, щоб вимірювати фізичні параметри: структурно-механічні властивості вздовж і впоперек волокон, теплопровідність, електропровідність і теплоємність. За встановленими фізичними параметрами можна визначати технологічні властивості: жирність, жорсткість, вік м'яса (за електропровідністю). Принципову схему установки для комплексного визначення фізичних параметрів м'ясної сировини наведено на рис. 5.6.

За визначеними технологічними параметрами можна встановлювати оптимальні способи обробки (запікання,

тушкування, маринування тощо), а також режими термічної обробки (температура, час, швидкість руху повітря, вологість).

Універсальний вимірювальний прилад 10–12-розрядний

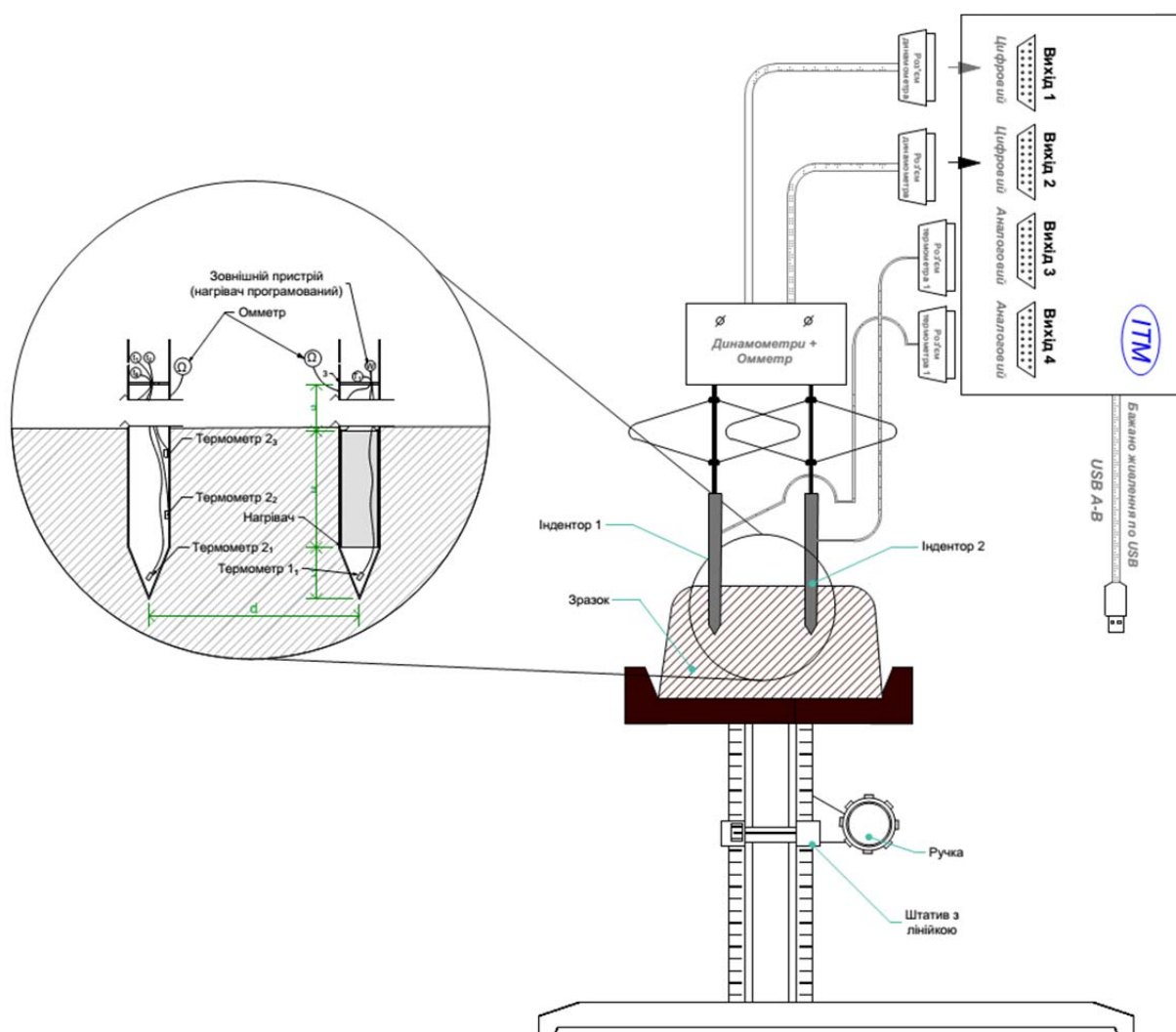


Рис. 5.6. Схема установки для комплексного визначення фізичних параметрів м'ясної сировини

Датчик складається із двох сталевих циліндрів, що мають загострені нижні кінці. Циліндри закріплені на динамометрах і можуть рухатися незалежно в межах ± 3 мм. У циліндрі 1 міститься плівковий нагрівальний елемент і напівпровідниковий термометр (див. рис. 5.6).

Алгоритм вимірювання

Циліндри одночасно занурюють у шматок м'яса до певної глибини (22 ± 1 мм). Під час занурення визначають силу опору тканини. Швидкість занурення визначається за відношенням глибини занурення до часу опору тканин і обчислюється автоматично (визначаємо структуру м'яса).

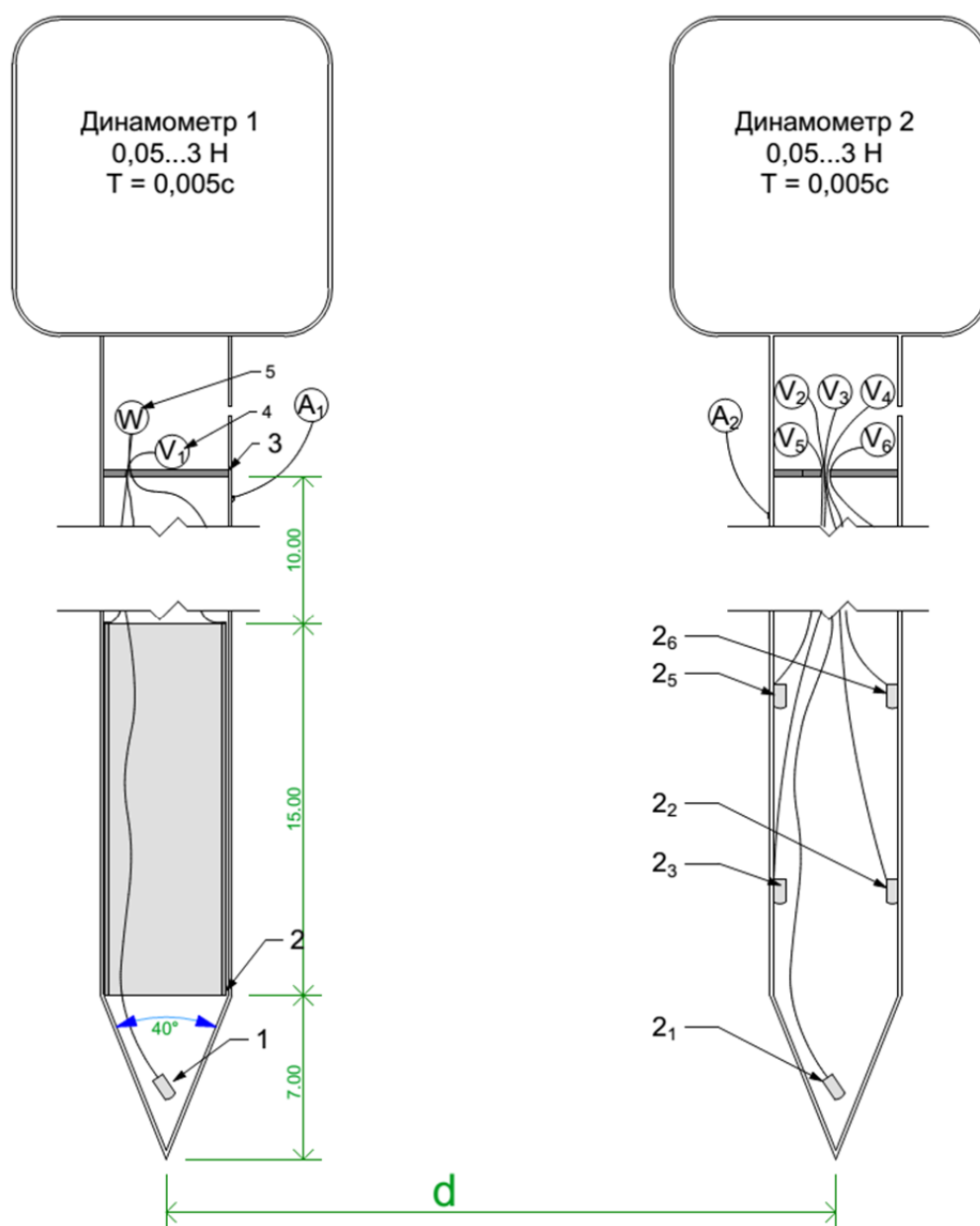


Рис. 5.7. Будова датчиків для комплексного визначення фізичних параметрів м'ясної сировини

Після занурення на циліндр 1 подається напруга в 5 В. Двома амперметрами фіксується сила вхідного і вихідного струму (на випадок витоків струму із контура). За відношенням сили струму до напруги визначається провідність м'яса.

На наступному етапі вмикається нагрів циліндра 1 і фіксується його температура. Оскільки розміри зразка м'яса значно перевищують розміри датчика, то вважатимемо, що тепло розповсюджується нерівномірно лише за рахунок нерівномірної структури м'яса. Отже, зафіксувавши швидкість зміни температури поверхні циліндра 2 відносно температури всередині циліндра 1, визначаємо теплопровідність м'яса.

Після обрахунку теплопровідності повторюють визначення електропровідності (білки вже частково денатуровані).

Під час витягування інденторів, знаючи площу їхньої зануреної поверхні і силу опору, визначають адгезію.

За співвідношенням згаданих вище фізичних властивостей зразка м'яса можна наближено визначити жирність, вологість, структуру (походження, вік тварини або птиці), і надати рекомендації щодо оптимальної технологічної обробки.

Розділ 6

ВИКОРИСТАННЯ ФОТО- ТА ВІДЕОРЕЄСТРАТОРІВ ПІД ЧАС ВИМІРЮВАНЬ НА ПРИЛАДІ МІГ-1.3

6.1. Відеофіксація процесів та експериментів

Налаштування фотомодуля «Лабораторії МІГ-1.3»

Важливим джерелом знань про об'єкт дослідження може бути відеозображення перебігу експерименту [107]. МІГ-1.3 забезпечує одночасний або синхронний запис відеозображень протікання експерименту з даними вимірювань.

Для включення режиму відео потрібно відкрити закладку «Відео» та зробити необхідні налаштування звуку та зображення. Джерелом сигналу може слугувати цифрова відеокамера або USB-мікроскоп. Одночасний запис дозволяє стежити за перебігом експерименту в реальному часі або відтворювати записаний експеримент.

Потік відео записується з частотою 25 кадрів за секунду (залежить від способу стиснення відео), період вимірювань встановлюється користувачем окремо. При синхронному записі відео кожному кадру відповідає певна точка графіка. Період вимірювання у такому випадку повинен бути кратний періоду зйомки кадрів відео (40 мс).

Для ввімкнення режиму синхронної зйомки після ввімкнення режиму відео слід повернутися у вікно «Активація вимірювання» й встановити позначку «v» «Період вимірювання».

Режим синхронного запису відео використовують для покадрового стеження за зміною параметрів процесу та «стиснення в часі» довготривалих процесів. Наприклад, відеоролик, що знімався протягом 24 год з періодом зйомки 2 хв, буде відтворюватись близько 29 с.

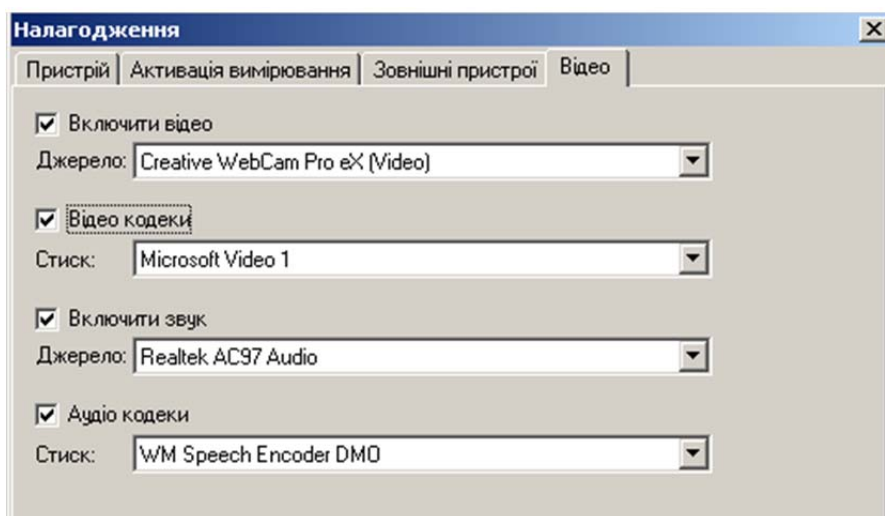


Рис. 6.1. Вікно «Відео» програми «Лабораторія МІГ-1.3»

Як було зазначено, мультимедійний проект можна зберігати. Потрібно обрати, у якому вигляді буде збережено експеримент.

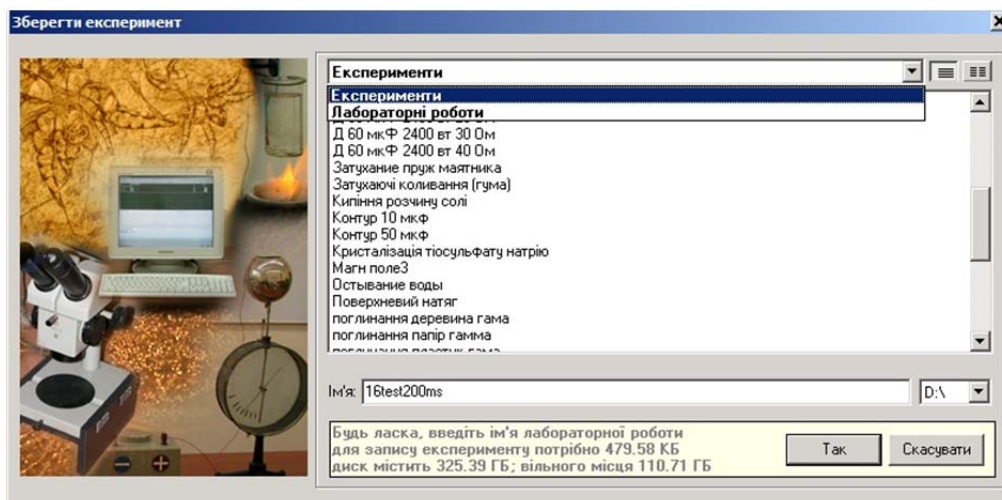


Рис. 6.2. Вікно збереження мультимедійного проекту програми «Лабораторія МІГ-1.3»

Для подальшого використання мультимедійний проект у вигляді самостійного електронного засобу навчання зберігають у каталозі «Експерименти». Перегляд записаного експерименту або демонстрація в аудиторії не потребує підключення приладу. Якщо підключити прилад і відкрити

збережений експеримент, можна зробити новий запис, скориставшись існуючими налаштуваннями. Доступ до записаних експериментів здійснюється у режимі «Бібліотека експериментів».

Запис у каталог «Результати досліджень» дозволяє відкривати налаштування, зроблені для автоматизації лабораторних установок. Цей режим не передбачає доступу до налаштувань, а лише дає можливість користувачеві провести вимірювання і обробити результати експерименту.

Режим фото-, відеофіксації мікропроцесів доцільно використовувати виключно із стаціонарно встановленою автоматизованою лабораторною установкою [108].

Налаштування програми-драйвера оптичного пристрою (на прикладі мікроскопа 500 x SDM)

Під час дослідження більшості фізичних процесів, що протікають у харчових продуктах, бажано мати уявлення про структуру і геометричні форми їх компонентів. Адже встановлення закономірностей протікання технологічних процесів безпосередньо залежить від характеру взаємозв'язку між мікроструктурою і властивостями речовин [109].


Саме тому виникла необхідність використання спеціального обладнання для фото- та відеофіксації мікропроцесів під час дослідження змін фізичних властивостей харчових продуктів [110].

Із відомих способів мікрофотографії найбільш простий у використанні та доступний – це оптична фотографія. Її роздільної здатності і збільшення цілком достатньо для вивчення властивостей більшості біологічних мікрооб'єктів [111].

Для забезпечення фото- та відеофіксації фізичних явищ у процесі проведення експерименту на приладі МІГ-1.3 обрано оптичний мікроскоп Digimicroscope 500 x SDM. Прилад має певні недоліки, роздільна здатність, збільшення налаштування ПЗ драйвера та ціна знаходяться у оптимальному співвідношенні.

Перед тим, як вмикати відеофіксацію процесів під час експерименту, необхідно налаштувати програму – драйвер цифрової камери. Це значно розширить її можливості та дозволить визначати динаміку розмірів та швидкостей мікрооб'єктів.

Нижче описано процес налаштування програми Digimicroscope, що управляє роботою мікроскопа 500 x SDM.

Спочатку треба вставити USB-кабель мікроскопа в USB-порт  приладу МІГ-1,3, далі на робочому столі запусити програму Digimicroscope, значок якої розміщено лівіше. Вікно програми Digimicroscope зображено на рис. 6.3.

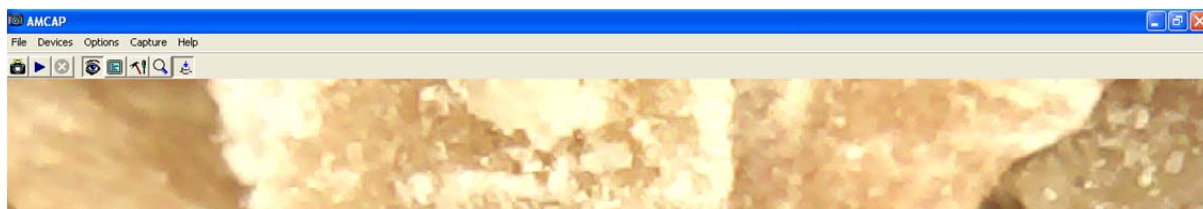



Рис. 6.3. Вікно програми Digimicroscope

Далі слід викликати меню «Властивості файлу», для цього в меню «Option» потрібно вибрати «VideoCapturefilter...» або натиснути значок .

Меню «Властивості файлу» дозволяє налаштовувати графічні фільтри, частоту кадрів та шкалу для вимірювання відстаней мікроскопом 500 x SDM.

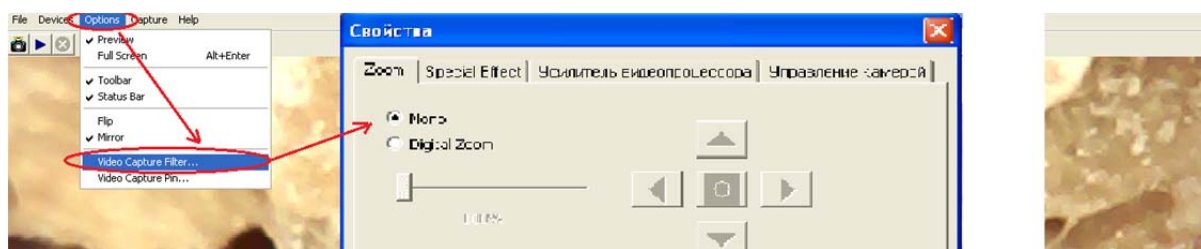


Рис. 6.4. Вікно програми Digimicroscope меню «Властивості»

Щоб застосувати будь-який графічний фільтр (спеціальний ефект), необхідно у вікні «Properties» (рис. 6.5) вибрати вкладку «Special Effect» і в списку вибрати потрібний графічний фільтр.

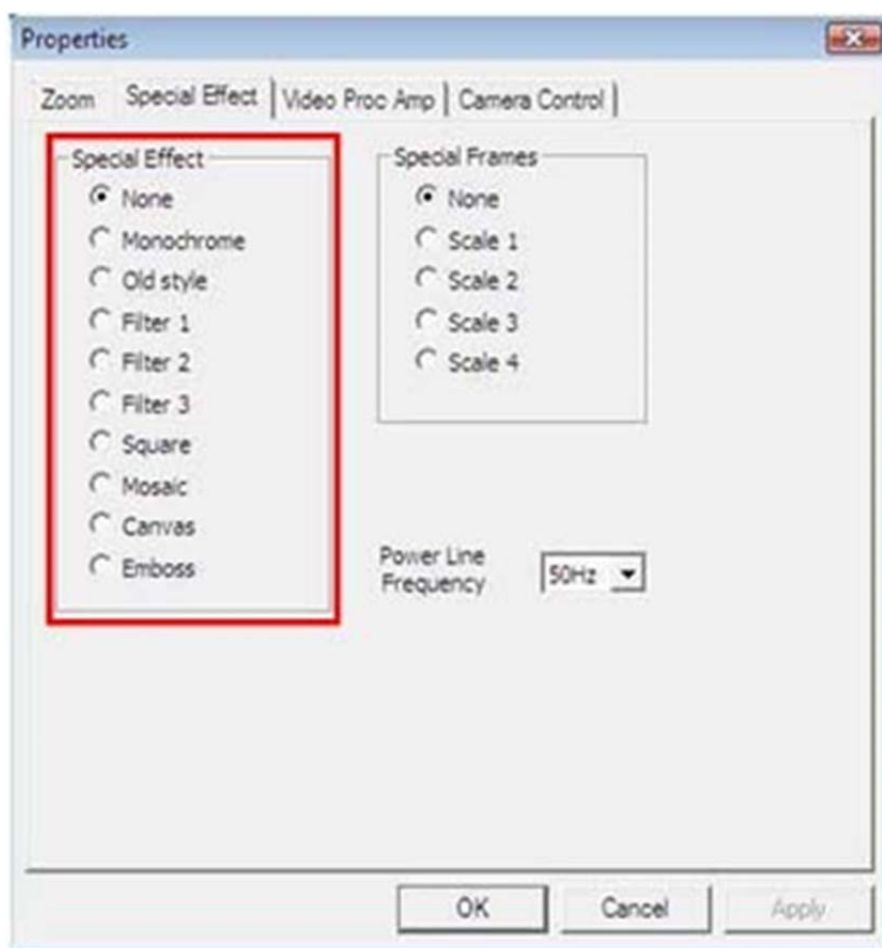
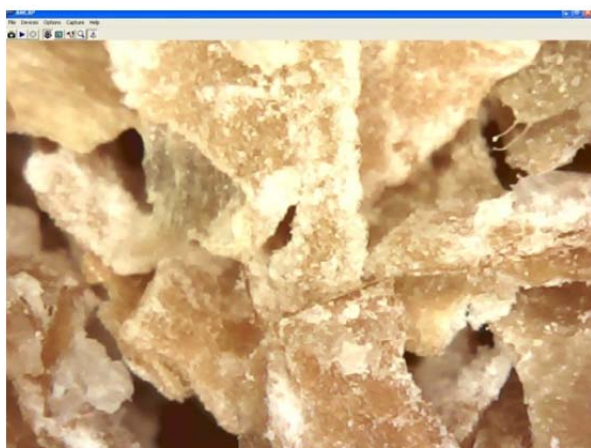


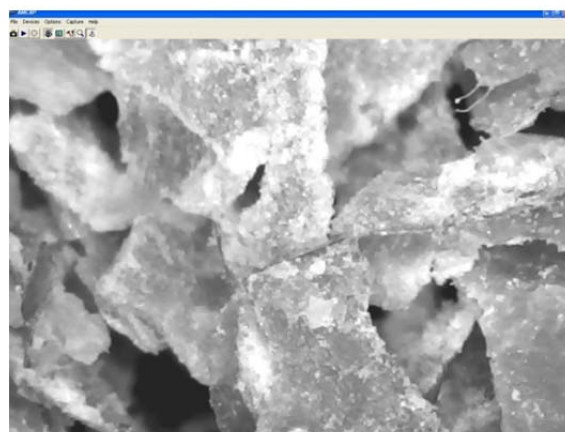
Рис. 6.5. Вікно програми Digimicroscope
вкладка «Special Effect»

Переважна більшість графічних фільтрів, скоріш за все, не будуть затребувані у наукових дослідженнях, але використання деяких фільтрів дозволяє чіткіше побачити окремі об'єкти, особливо якщо вони зливаються з фоном середовища.

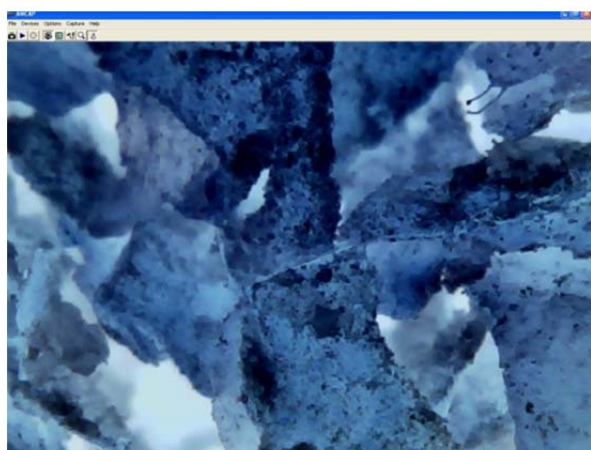
На рис. 6.6 наведено приклади застосування деяких фільтрів при фотографуванні висівок пшеничних.



Оригінальне зображення (None)



Зображення у відтінках сірого (Monochrome)



Фільтр 1 (Filter)



Фільтр 3 (Filter 3)

Рис. 6.6. Результати застосування графічних фільтрів «Special Effect» при фотографуванні висівок пшеничних

Як видно з рис. 6.6, застосування монохромного фільтру доцільно при публікації фотографій у друкованих виданнях. Фільтр 1 створює максимально контрастне інвертоване зображення, завдяки чому видно віддалені області фотографії. Фільтр 3 підвищує контрастність фотографії із збереженням інтенсивності забарвлення мікрооб'єктів.

Значно кориснішим для фото- і відеофіксації явищ є встановлення лінійки (рамки). Це дозволяє визначати розміри об'єктів із невеликою точністю, а також їх швидкість та встановлювати траєкторію руху.

Для вибору лінійки (frames, рамки) на вкладці «Special Effect» слід вибрати один з варіантів лінійок «Special Frames». Залежно від запланованого експерименту і очікуваних функцій мікрофотографії можна застосовувати рамки «Scale 1», «Scale 2», «Scale 3», «Scale 4» (рис. 6.7).

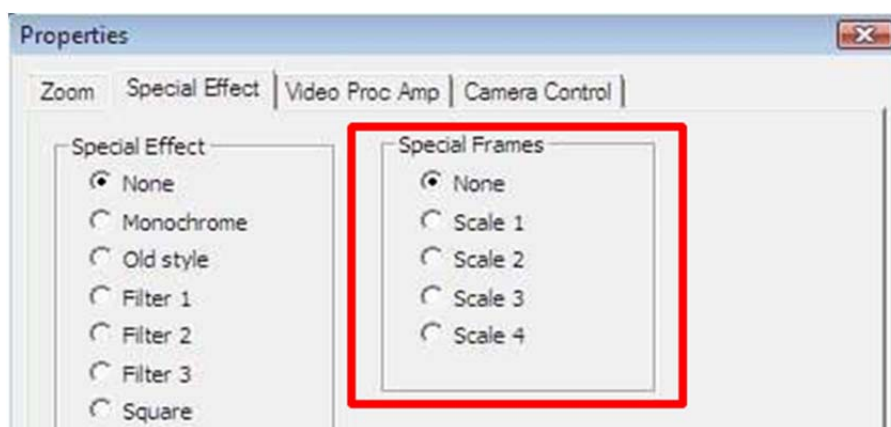


Рис. 6.7. Вікно програми Digimicroscope, вкладка «Special Effect», процес вибору лінійки (рамки)

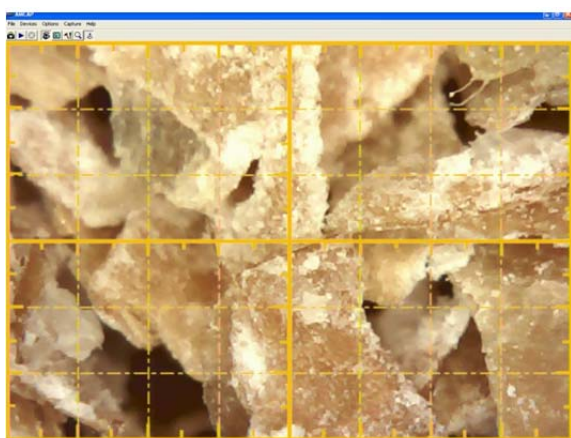
На рис. 6.8 наведено приклади застосування рамок при фотографуванні висівок пшеничних.

Лінійка «Scale 1» може використовуватися для визначення заповненості області (наприклад, для дослідження динаміки розмірів піни). Також цю лінійку доцільно застосовувати при визначенні лінійної швидкості об'єктів (наприклад, при дослідженні седиментації частинок).

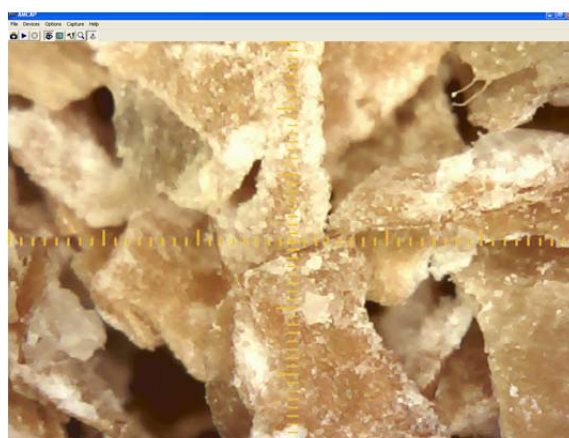
Лінійка «Scale 2» застосовується для визначення розмірів об'єктів за вимогою мінімального захаращення поля зору мікроскопа.

Лінійку «Scale 3» доцільно використовувати для визначення кутової швидкості об'єктів (наприклад, при дослідженні броунівського руху), а також для визначення насипної щільності сухих продуктів.

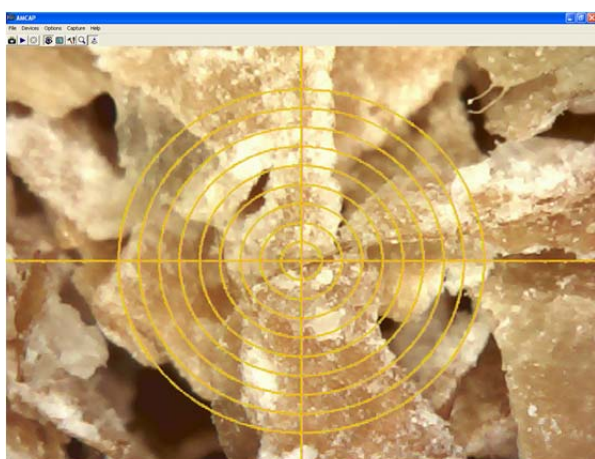
Радіальна лінійка «Scale 4» дозволяє визначати кути і, відповідно, використовується для виміру будь-яких кутових розмірів.



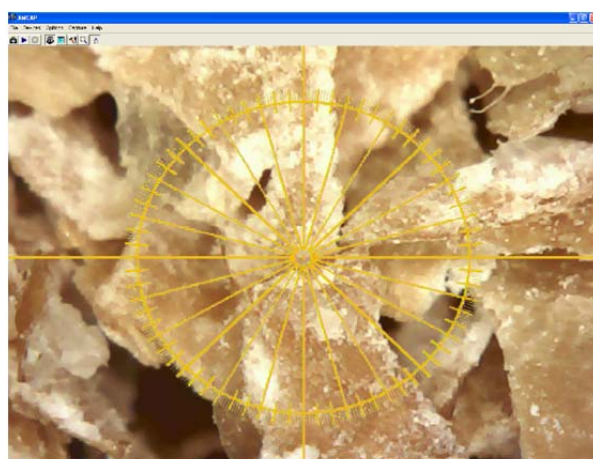
Scale 1



Scale 2




Scale 3



Scale 4

Рис. 6.8. Види лінійок (рамок) на мікроскопі 500 × SDM

У вкладці «Video Proc Amp» можна налаштувати графічні параметри зображення.

Встановлення роздільної здатності матриці мікроскопа відбувається через меню «Option» (рис. 6.9), далі «Video Capture Filer», а у вікні «Properties» необхідно вибрати належний розмір або натиснути значок .

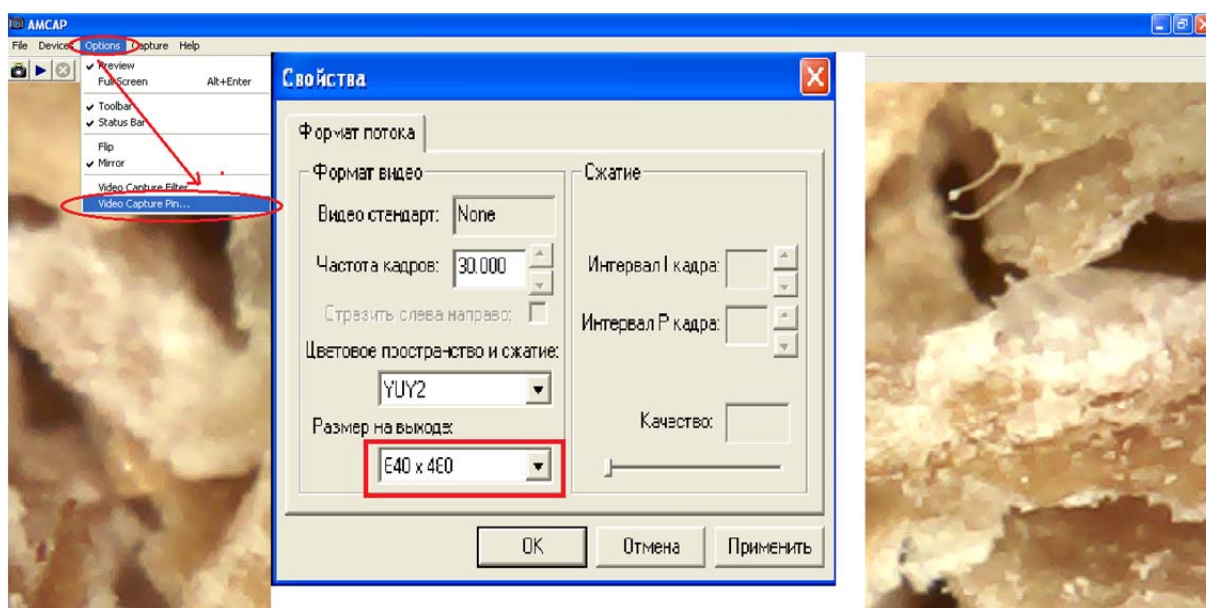


Рис. 6.9. Вікно програми Digimicroscope меню «Option», процес встановлення роздільної здатності матриці

Для збільшення розміру файлу слід обрати у вікні програми «Option», натиснути функціональну кнопку «Video Capture Filer». У вікні «Properties» вибрати потрібний розмір.

Також є можливість фіксації прямого («Flip») або дзеркального («Mirror») зображення, що актуально при фотографуванні із наскрізною підсвіткою об'єктів. Для необхідного типу зображення слід вибрати у вікні програми «Option» потрібні функції.

Щоб записати відео спочатку, треба застосувати будь-який ефект або лінійку. Для цього необхідно у вікні «Properties» відкрити вкладку «Special Effect» і в списку вибрати доцільні для даного експерименту графічний ефект або лінійку.

Далі потрібно створити файл, у якому збережеться відео. Для цього у вікні програми відкрити «File» і натиснути «Set Capture File». З'явиться вікно, у якому вибирають папку, де буде зберігатися відео.

Встановити розмір файлу можна, як показано на рис. 6.10, у вікні «Setfilesize».




а)




б)



Рис. 6.10. Встановлення максимального розміру відеофайлу:
а) у вікні програми Digimicroscope, б) у вікні «Set file size»

Для відтворення і початку запису необхідно у вікні програми вибрати «Capture», далі – «Start Capture» і у вікні відкрити потрібний файл або натиснути значок .

Щоб зупинити запис, потрібно у вікні програми вибрати «Capture», далі – «Stop Capture» або натиснути значок .

Файл з відеофіксацією процесу буде збережено в обраній папці.

6.2. Визначення розмірів частинок дисперсних матеріалів цифровими вимірювальними приладами

Найважливішими характеристиками багатьох дисперсних систем є розмір і форма елементів дисперсної фази (часток), так як велика частина інших властивостей таких систем залежить саме від цих параметрів.

Реальні дисперсні системи, як правило, містять частинки, мінімальний і максимальний розмір яких відрізняється на декілька порядків. Для таких систем визначення деякого середнього розміру часток вважається недостатнім і для більш повного опису конкретної системи необхідно встановити розподіл часток за розмірами [113].

Вимірювання розмірів об'єктів оптичним методом – одночасно простий і складний процес. Майже всі найперші вимірювання робили за допомогою лінійки, шляхом порівняння розмірів об'єктів або зображень і шкали лінійки. При вимірюванні відстаней 0,5...40 см з абсолютною похибкою 2...3 мм, а також при наявності плоского предмета дослідження (наприклад, відрізка в зошиті або товщини дерев'яної дошки) вимірювання оптичним методом є простим і швидким процесом.

Проте при використанні систем фокусування, змінних об'єктивів, цифрових матриць із різною роздільною здатністю, об'ємних об'єктів дослідження використання оптичних приладів для вимірювання має багато нюансів:

1. Шкала, нанесена на об'єктиві мініскопа, буде показувати правильні розміри лише тоді, якщо об'єкт розташований на передбаченій конструкцією відстані. Тому при використанні мініскопа (або оптичної лінійки) слід їх розміщувати безпосередньо на поверхні досліджуваного об'єкта (наприклад, при визначенні товщини волокон – на шматок тканини).

2. При роботі із цифровими зображеннями, що отримані через мікроскоп, складно розрахувати збільшення. Адже на збільшення зображення впливає:

- а) співрозмірність збільшення об'єктива цифрового мікроскопа;
- б) роздільна здатність матриці цифрової камери;
- в) розмір фотографії (кількість пікселів);
- г) фізичний розмір зображення на сторінці або моніторі (якщо розмістити фотографію в документі MS World, то порушується відповідність масштабу).

Для визначення розмірів об'єктів без спеціального обладнання достатньо створити шкалу із прозорим фоном (рис. 6.11) в будь-якому графічному редакторі (наприклад, Paint.NET). З інструкцією створення шкали прозорим фоном можна ознайомитися на багатьох форумах, наприклад [114].

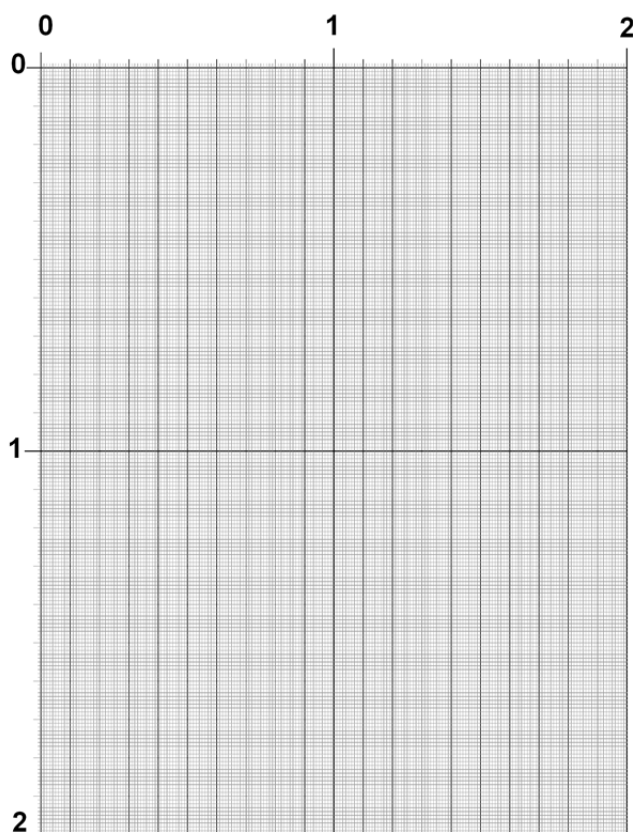
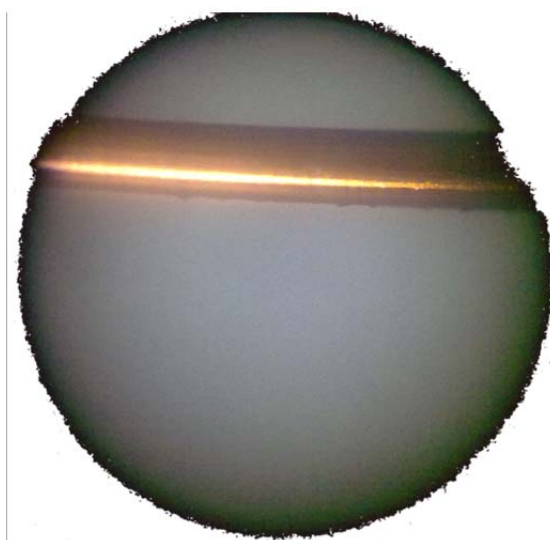


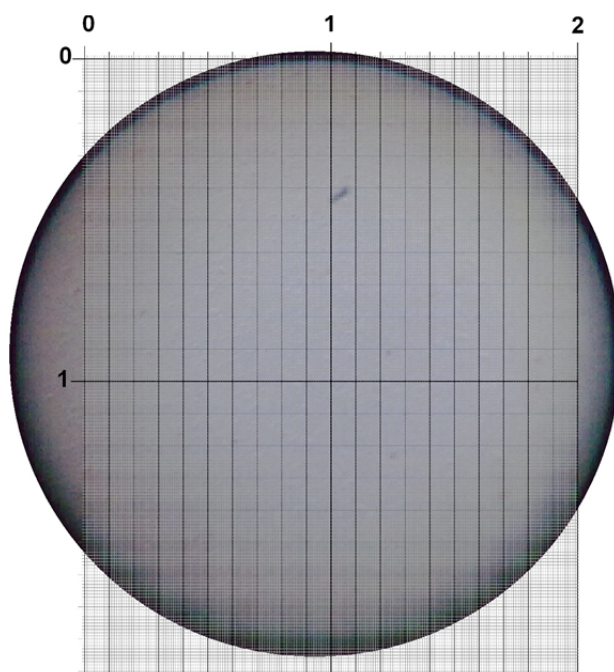
Рис. 6.11. Шкала для визначення розмірів об'єктів за допомогою камери мобільного телефону

3. Зображення об'єктів або дисперсних систем легко зафіксувати, підставивши фотокамеру свого телефону до окуляра мініскопа або оптичної лінійки (рис. 6.12). Обов'язковою умовою є розміри об'єктива камери мобільного телефону – вони повинні бути менше розмірів окуляра оптичного приладу.



*Рис. 6.12. Фотографія мідного дроту товщиною 500 мкм
з роздільною здатністю 3264×2448 Рх*

4. Після того, як було зроблено 4–5 фотографій, можна, не поспішаючи, визначати розміри. Приклад визначення розмірів частинок за допомогою оптичного мініскопа та камери мобільного телефону наведено на рис. 6.13.



*Рис. 6.13. Поле зору оптичної лінійки МПБ-2, сфотографоване
з роздільною здатністю 3264×2448 Рх. Об'єкт – розчин
молочного шоколаду в соняшниковій олії 1:4*

5. Оптична лінійка МПБ-2 не має підсвітки, тому її слід розташовувати білою поверхнею до джерела світла (вікна).

6. Підсвітка мініскопа MG-10085-1A вмикається при відкриванні. Під час визначення методом «світлого фону» розмірів об'єктів, що світяться, слід вимикати підсвітку.

7. Мікроскоп 500 x SDM потрібно закріпити на штативі та для стабільності показників розмістити на поверхні досліджуваного об'єкта прозорою частиною об'єктива.

Якщо сфотографувати об'єкт за допомогою цифрового мікроскопа, то доволі легко, порахувавши кількість пікселів на частині зображення, виміряти розміри частини об'єкта. Проте на практиці всі перераховані вище особливості вносять суттєву похибку у результати вимірювань. Інколи при неправильній експлуатації мікроскопа виміряні розміри відрізняються від справжніх в 5,6 рази.

Крім того, є об'єкти, які можна виміряти лише за допомогою оптичних приладів (наприклад, пікселі на TFT екрані).

Матриця мікроскопа 500 x SDM дозволяє робити зображення із роздільною здатністю від 320x240 до 1600x1200 пікселів. Варто нагадати, що роздільна здатність камери разом із кратністю об'єктива визначає збільшення цифрового мікроскопа. Тому невеликі об'єкти (наприклад, пікселі екранів типу Retina) варто фотографувати при найбільшій роздільній здатності.

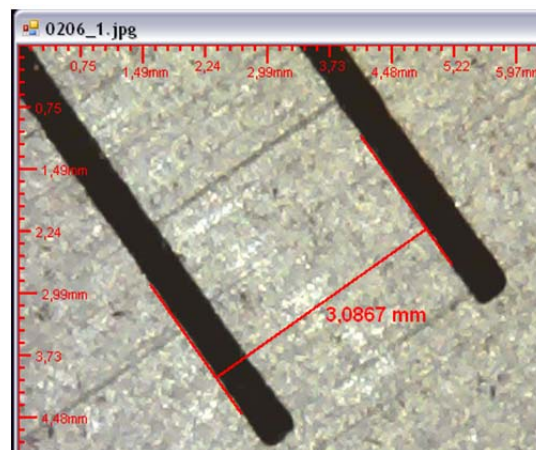
Мікроскоп та програмне забезпечення, як правило, вже відкаліброване, проте перед виконанням дослідження варто перевірити калібрування.

Правильність налаштування мікроскопа 500 x SDM та програми для роботи з фотографіями мікрооб'єктів Micro-Measure можна перевірити, вимірявши заздалегідь відому відстань (наприклад, відстань між однаковими гранями поділок ціною в 1 мм на шкалі штангенциркуля). Якщо значення відстані, показаної інструментами «Paralel» або «Distance Measurement», будуть відрізнятися від справжньої відстані на менш ніж на 5%, то калібрування вважається правильним.

Приклади налаштування програми Micro-Measure наведено на рис. 6.14. На фотографії зображено шкалу штангенциркуля із ціною поділки 1 мм.



а) правильне налаштування програми Micro-Measure




а) неправильне налаштування програми Micro-Measure

Рис. 6.14. Правильне і неправильне вимірювання відстані в програмі Micro-Measure

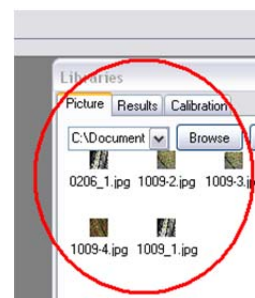
Для вимірювання розмірів мікрочастинок необхідно:

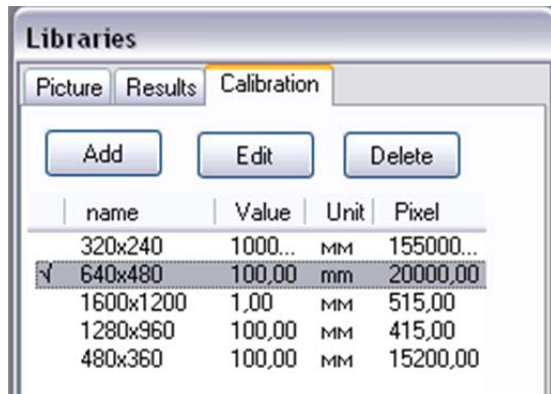
1. Запустити програму Micro-Measure.
2. Навести мікроскоп на досліджуваний об'єкт та налаштувати фокус на корпусі мікроскопа.
3. Вибрати роздільну здатність матриці камери мікроскопа

кнопкою  «Zoom» на корпусі мікроскопу або кнопкою «Open Video» в програмі Micro-Measure. Роздільну здатність матриці камери мікроскопа слід обирати залежно від дисперсної системи.


4. Зробити фотографію шкали штангенциркуля (або іншого об'єкта відомого розміру) та 3–4 фотографії досліджуваного об'єкта, натиснувши кнопку «Capture Picture».

5. Перейти до режиму перегляду фотографій (вкладка «Picture» вікна «Libraries») та два рази натиснути на щойно зроблене фото об'єкта. Фотографія повинна відкритися у новому вікні.





6. У вкладці «Calibration» вікна «Libraries» вибрати розмір зображення. Якщо буде встановлений розмір зображення, який не відповідає реальному розміру, то отримані показники будуть неправильними. У програмі Micro-Measure роздільна здатність камери і розмір зображення встановлюються різними інструментами.

7. За допомогою інструментів «Parallel»  та «Distance Measurement» виміряти відстань між однаковими гранями двох паралельних поділок основної шкали штангенциркуля. Якщо виміряна відстань відрізняється від справжньої не більш як на 5%, то мікроскоп налаштований правильно і можна визначати розміри мікрооб'єктів.

8. Аналогічним способом слід вимірювати габаритні розміри досліджуваних об'єктів, як наведено на прикладі (рис. 6.15):

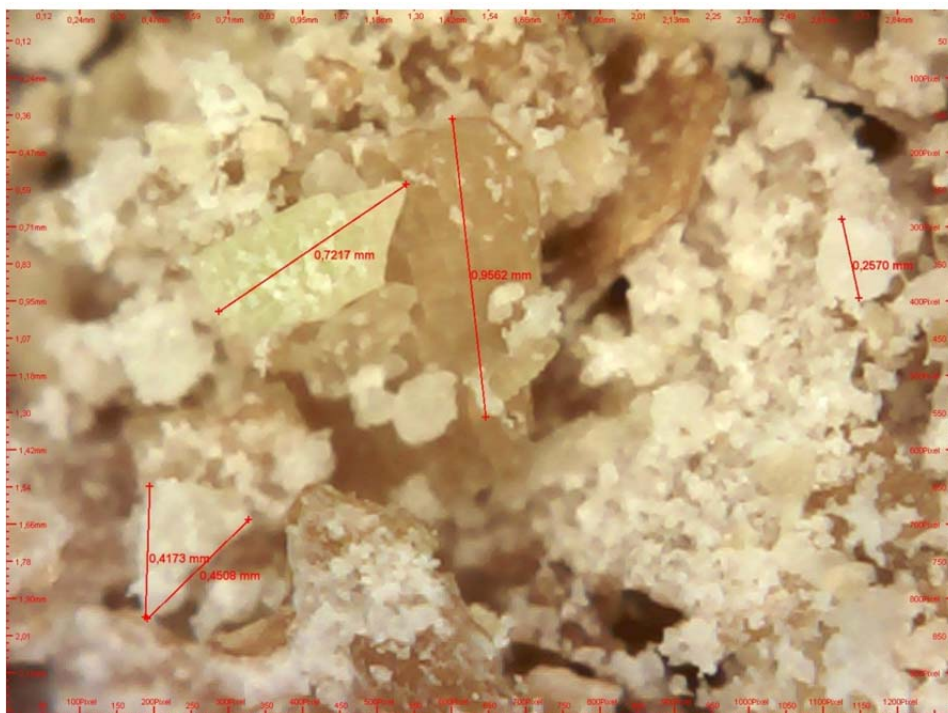


Рис. 6.15. Визначення розмірів частинок дисперсної системи на прикладі висівок пшеничних

Всі визначені розміри фіксуються у вигляді таблиці, яку потім можна експортувати до табличного процесора (MS Excel).

Якщо необхідно визначити наповненість компонентом дисперсної системи поля зору мікроскопа (або певного розміру), то доцільно використовувати інструмент «шкала» (рис. 6.16). У програмі Micro-Measure такого інструменту немає, проте його легко додати в будь-якому графічному редакторі.

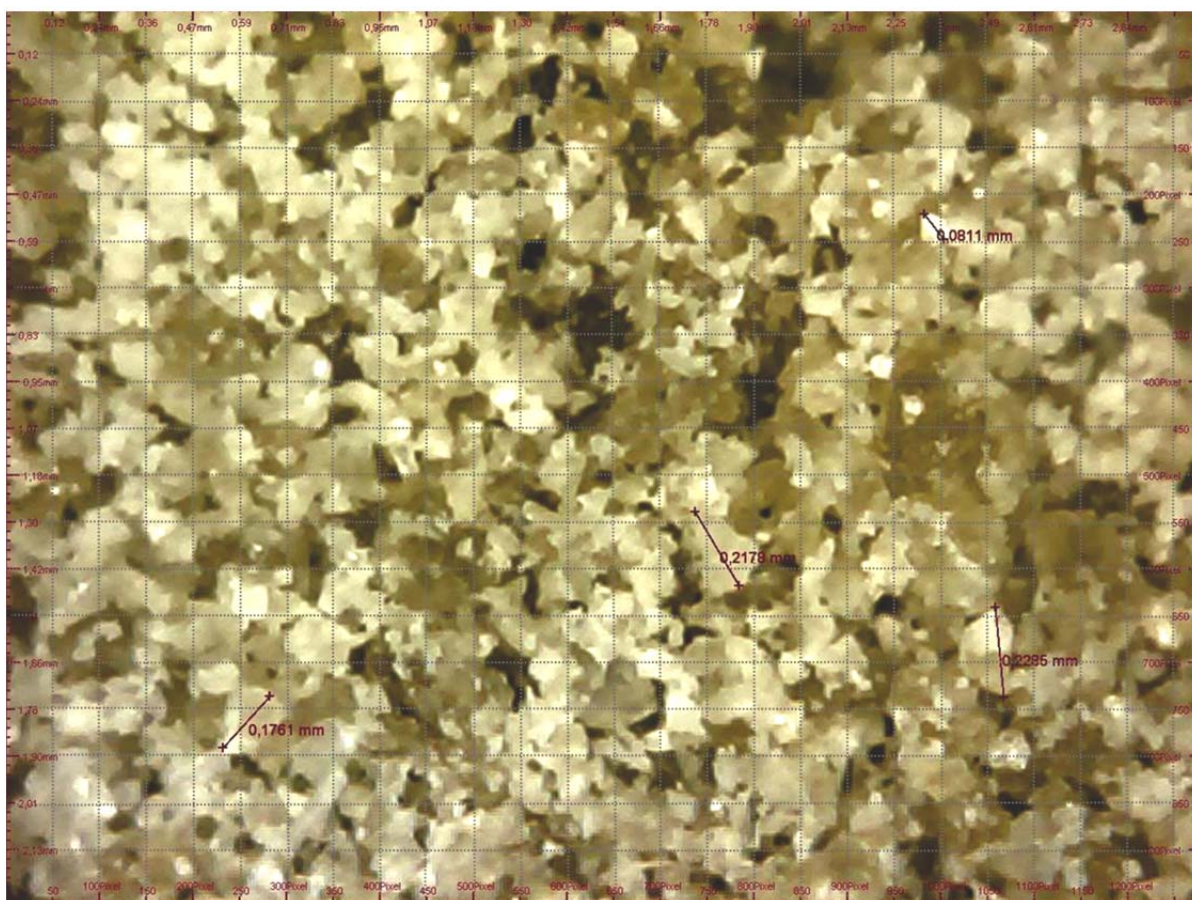


Рис. 6.16. Приклад визначення насипної щільності дисперсної системи за допомогою інструмента «шкала» у графічному редакторі Paint.NET

Якщо дисперсна система містить декілька типів об'єктів, то їх необхідно позначати різними позначками (рис. 6.17).

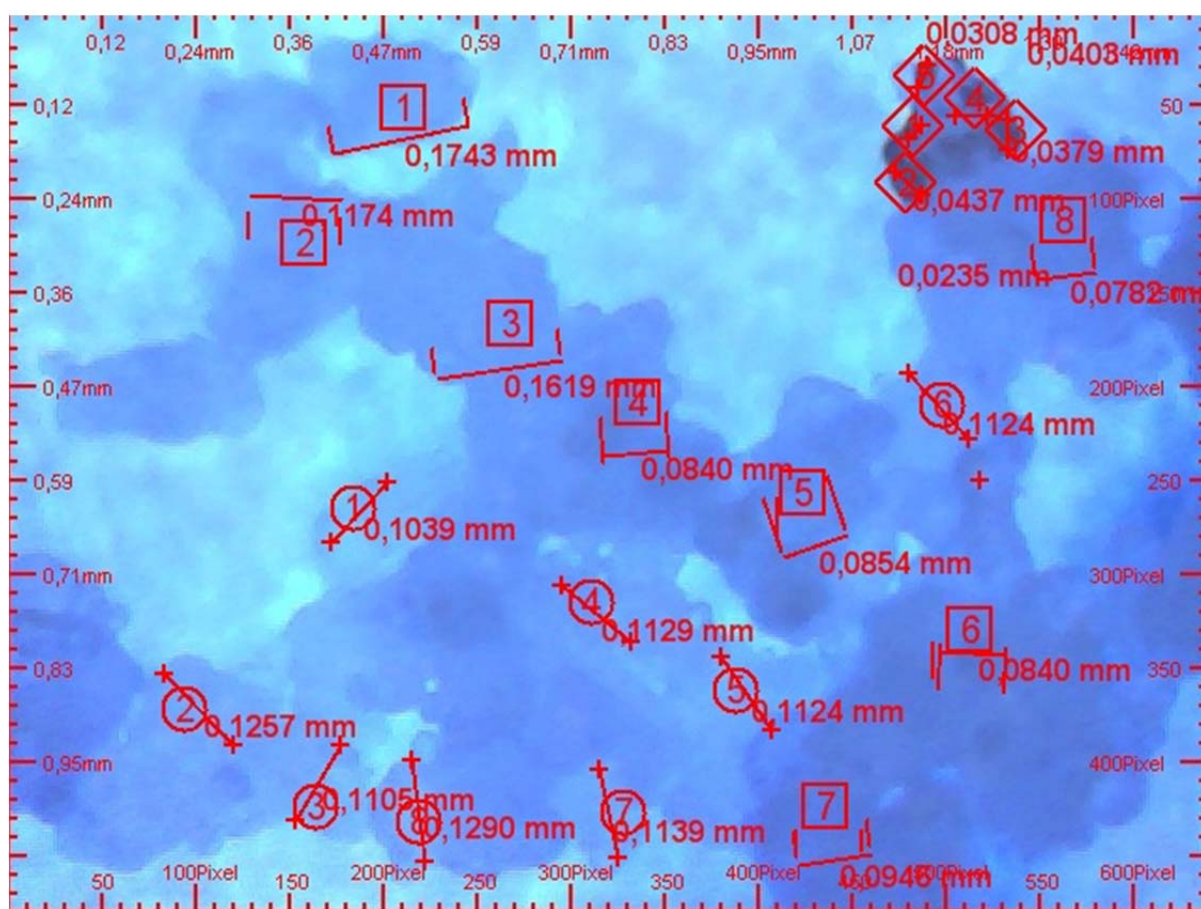


Рис. 6.17. Визначення розмірів частинок дисперсної багатоконпонентної системи на прикладі порошку для ентерального харчування

Як видно із рис. 6.17, розміри одного типу частинок визначали за допомогою інструмента «Paralel», а іншого – за допомогою «Distance Measurement», це надає змогу експортувати до табличного процесора розміри двох типів об’єктів одночасно.

Для автоматизації підрахунку розмірів частинок дисперсної системи програма Micro-Measure дозволяє експортувати дані вимірювання до табличного процесора MS Excel. Приклад експорту даних розмірів частинок двокомпонентної дисперсної системи наведено на рис. 6.18.

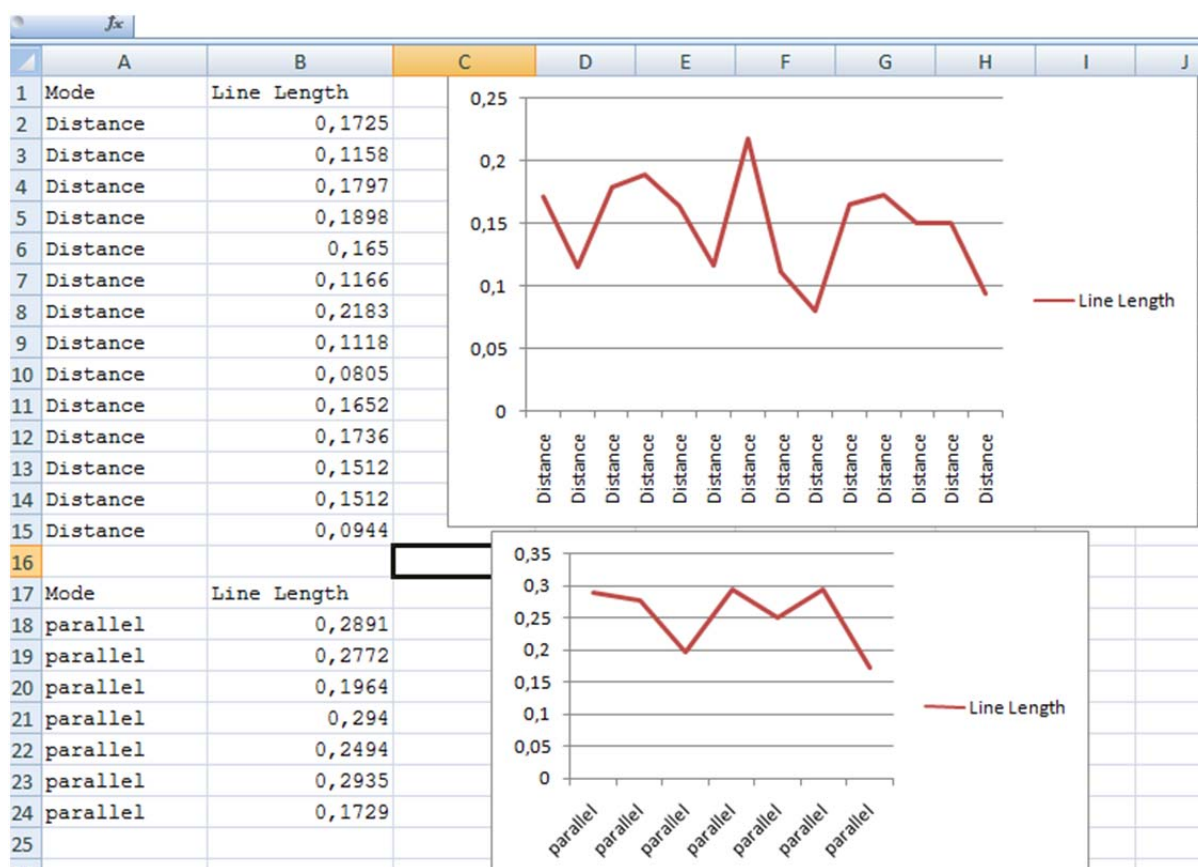


Рис. 6.18. Вікно програми MS Excel. Результати вимірювання розмірів двох типів частинок дисперсної системи

Оскільки два компоненти виміряні різними інструментами, то дані про їх розміри містяться у різних таблицях. Це дозволяє прискорити процес і частково автоматизувати дисперсний аналіз.

Дисперсний аналіз досліджуваних частинок

Проведення дисперсного складу досліджуваної системи полягає у визначенні розмірів, числа і форми частинок за мікрофотографіями.

Якщо порошок містить частинки у великому інтервалі розмірів, що через недостатню глибину різкості об'єктива мікроскопа не дозволяє отримувати чітке зображення одночасно всіх частинок (див. рис. 6.19), то малі і великі частинки спостерігають і вимірюють при різних збільшеннях або при різній роздільній здатності матриці мікроскопа.

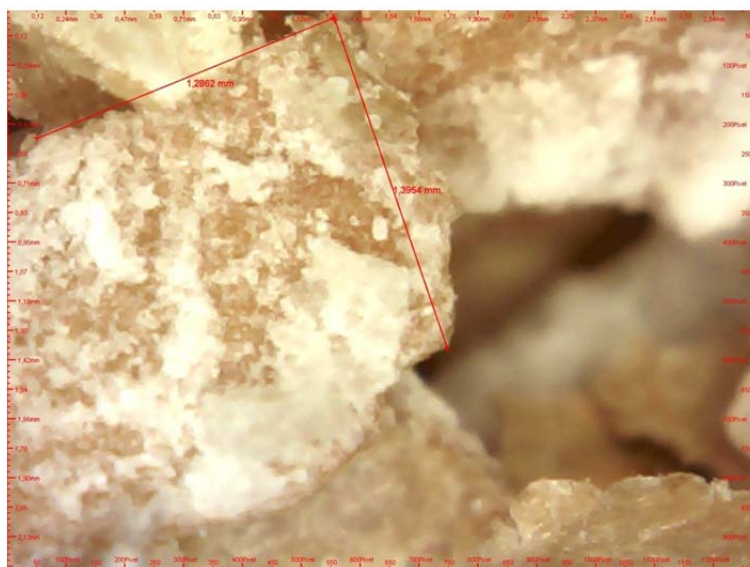


Рис. 6.19. Приклад визначення дисперсії висівок пшеничних, коли розміри частинок не поміщаються у поле зору мікроскопа

Результати вимірювань, одержані при різних збільшеннях, узагальнюють щодо фракцій частинок. Для отримання достовірних результатів підрахунку частинок за фракціями вимірювання слід проводити не менше 6 разів на різних місцях.

Як приклад, розглянемо дисперсійний аналіз на основі обробки мікрофотографій висівок пшеничних, отриманих за допомогою мікроскопа 500 x SDM. На рис. 6.20 наведено одну із серій мікрофотографій.

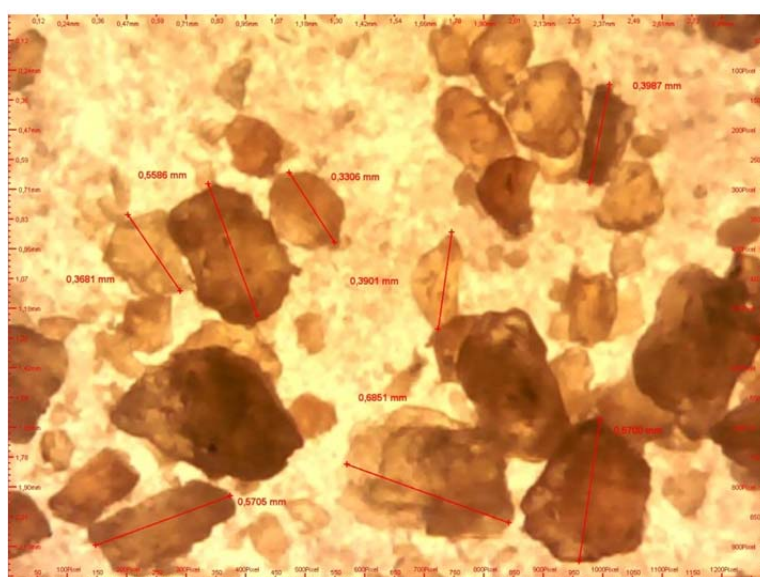
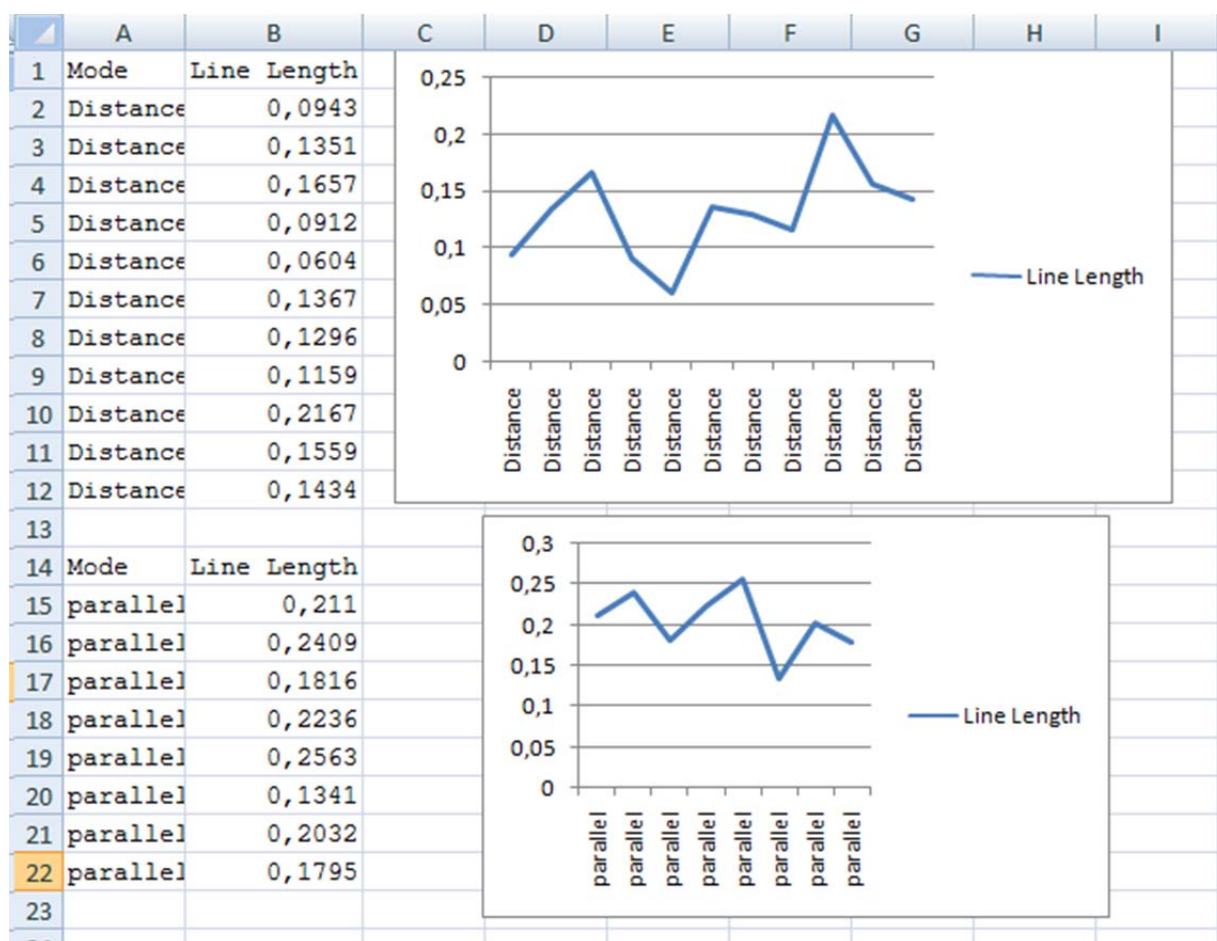


Рис. 6.20. Визначення дисперсії висівок пшеничних

Як видно з представлених даних, частинки порошку мають неправильну форму, а їх розмір не перевищує 700 мкм, тому для характеристики їхньої дисперсії будемо використувати середній лінійний розмір.

Результати вимірювань зберігаються в окремому вікні, автоматично розраховується середній діаметр частинок. Для подальших розрахунків отримані результати можна скопіювати в табличний процесор. На рис. 6.21 наведено приклад розрахунку розмірів частинок у програмі MS Excel.



*Рис. 6.21. Розрахунок дисперсії частинок висівок пшеничних
у програмі MS Excel 2010*

Після підрахунку всіх частинок на обраній фотографії необхідно зберегти отримані дані і перейти до наступної, відкривши новий файл. При цьому якщо масштаб наступної фотографії відрізняється, то необхідно провести знову калібрування області зображення.

Дані для побудови кривих чисельного розподілу часток за розмірами наведено в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Розміри частинок об'єктів у висівках пшеничних

Розподіл, мкм	10...25	26...120	121...240	241...500	501...750	751...1000
$d_{\text{серед}}$, мкм	19	96	165	264	610	
n , шт	19	48	27	6	4	0
Розподіл, S_n	100... 625	626... 14400	14641... 57600	58081... 250000	251001... 562500	564001... 1000000
S_n серед, мкм ²	283,528	7238,22947	21382,465	54739,1104	292246,6566	0
n , шт	19	48	27	6	4	0
Розподіл, D_n	10...25	26...120	121...240	241...500	501...750	751...1000
ΔQ , %	18,27	46,15	25,96	5,77	3,85	0,00
n , шт	19	48	27	6	4	0
D_n серед, мкм	19	96	165	264	610	0
ΔQ , %	18,26923	46,15384615	25,96153846	5,769230769	3,846153846	

Зразок побудови кривих диференціального розподілу мікрочастинок за розмірами на прикладі висівок пшеничних наведено на рис. 6.22.

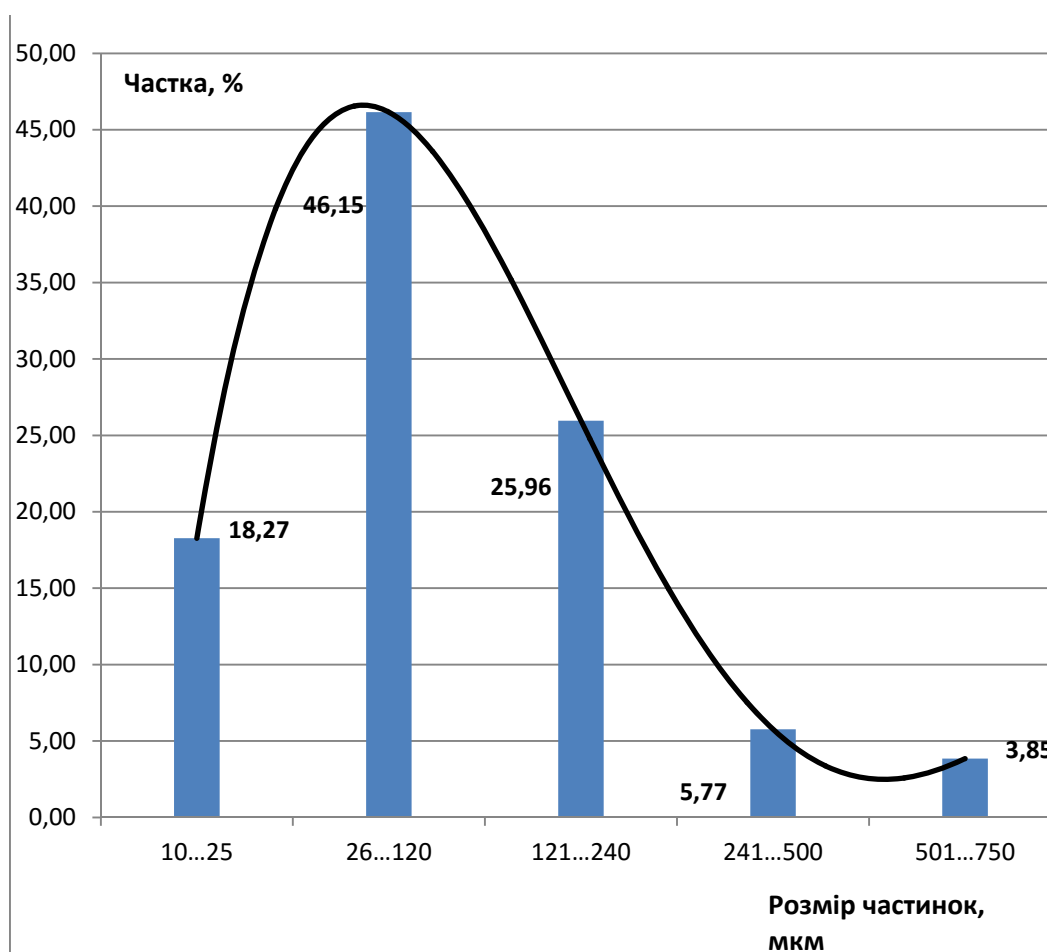


Рис. 6.22. Крива диференціального розподілу мікрочастинок за розмірами у висівках пшеничних

Загалом з отриманих даних випливає, що експериментальна крива розподілу часток досліджуваного зразка найкращим чином описується поліноміальним рівнянням третього ступеня.

Отже, мікроскопічні методи аналізу широко застосовуються для дослідження форми, розмірів частинок, морфології, вивчення їх будови і структури, оскільки вони є досить простими і дуже інформативними методами вивчення дисперсного складу сировини харчової промисловості.

ВИСНОВКИ

На сьогодні одним з пріоритетних напрямів дослідження матеріалів є вивчення їх фізичних властивостей, адже споживчі властивості всіх товарів, у тому числі харчових продуктів, знаходяться в прямій залежності від фізичних властивостей кожного їх компонента.

Для визначення реологічних, електрофізичних і теплофізичних властивостей сировини та матеріалів використовують промислові прилади, в яких мікропроцесорний блок автоматично обраховує значення кожної окремої величини. Проте значним недоліком промислових приладів є висока ціна та вузька спеціалізація. Також для автоматичного аналізу отриманих даних дослідники мають щоразу створювати власне програмне забезпечення або розрахункові таблиці.

Реальною альтернативою дорогому імпортному устаткуванню є вимірювальна платформа «Універсальний комп'ютерний вимірювальний прилад» (УКВП) виробництва харківської фірми «ІТМ». Проте в базовій комплектації УКВП немає високочутливих датчиків, створених для роботи з харчовими продуктами. Через відкриту архітектуру УКВП дозволяє стороннім виробникам або окремим лабораторіям створювати датчики відповідно до власних потреб. З огляду на вищезгадане, маємо всі передумови для розробки способу експрес-діагностики показників якості харчових продуктів з використанням вітчизняного обладнання.

Авторами спроектовано та виготовлено партію комплексних датчиків та експериментальні зразки установки МІГ-1.3 для визначення теплофізичних властивостей та дослідження фізичних параметрів харчових продуктів, експрес-діагностики їх якості.

Виготовлене обладнання використовується в лабораторіях фізики та електротехніки кафедри інженерно-технічних дисциплін Київського національного торговельно-економічного університету (КНТЕУ), лабораторії Ужгородського торговельного інституту КНТЕУ, кабінеті фізики ліцею «Наукова зміна».

Розроблені установки та температурні датчики виготовили у м. Харкові із використанням не менше 60% вітчизняної складової (в тому числі програмного забезпечення). Тому вартість розроблених установок щонайменше в три рази менше, ніж вартість іноземних аналогів.

Експрес-діагностика показників якості сировини тваринного походження надасть змогу мінімізувати можливість потрапляння недоброякісної сировини до закладів торгівлі та ресторанного господарства та істотно зменшити кількість харчових отруєнь готовою продукцією. Створення системи автоматизованого формування рекомендацій щодо оптимізації рецептури та технологічних режимів обробки на основі фізичної моделі сировини дозволить знизити технологічні втрати, що також матиме економічний ефект.

Розроблені експрес-методику та обладнання запроваджено в освітній процес при викладанні дисциплін «Теплотехніка», «Устаткування закладів ресторанного господарства», «Вимірювальні прилади», «Фізичні методи дослідження», «Інженерно-технологічне обладнання».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коваль О.А. Методика визначення консистенції м'яса / О.А. Коваль, В.С. Гуць // Наук. пр. Нац. ун-ту харч. технологій. – 2005. – № 16. – С. 22–24.
2. The research of the gas-filled dough rheological characteristics / Y. Telichkun, V. Telichkun, V. Taran, O. Gubenia, M. Desik // Journal of EcoAgriTourism. – 2010. – № 6 (4). – P. 59–62.
3. Lab Master Slip and Friction PDF Product Sheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.testingmachines.com/32-91-lab-master-slip-friction.html>
4. Шаповал С.Л. Рекомендації до виконання науково-дослідних робіт на УВКП : лаб. практикум / С.Л. Шаповал, Н.П. Форостяна, Ю.В. Литвинов, Р.П. Романенко. – Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2013. – 96 с.
5. Гуць В.С. Рибні пресерви. Нова методика визначення консистенції / В.С. Гуць, О.В. Тимофєєва, О.В. Сидоренко // Харчова і переробна пром-сть. – 2006. – № 7. – С. 14–17.
6. Пат. № 200511305 Спосіб визначення консистенції харчових продуктів / В.С. Гуць, О.А. Коваль, О.В. Сидоренко, О.В. Тимофєєва ; заявник і патентовласник КНТЕУ – № 200511305 ; заявл. 29.11.2005 ; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.
7. Одарченко Д.М. Заморожені напівфабрикати з дикорослих ягід : монографія / Д.М. Одарченко, А.І. Кудряшов, А.О. Бабіч. – Харків : ХДУХТ, 2014. – 181 с.
8. Белінська С.О. Управління безпечністю та якістю швидкозамороженої плодоовочевої продукції : дис. д-ра техн. наук : 05.18.15 / С.О. Белінська. – Київ, 2010. – 76 с.

9. Сухенко В.Ю. Механіка біополімерів м'яса / Наук. вісн. Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. – (Сер.: Техніка та енергетика АПК). – 2012. – № 170 (1). – С. 292–304.
10. García-Segovia P.A. Andrés-Bello and J. Martínez-Monzó. Effect of cooking method on mechanical properties, color and structure of beef muscle (M. pectoralis) / Journal of Food Engineering 80.3 (2007). – P. 813–821.
11. Perlo F. Physicochemical and sensory properties of chicken nuggets with washed mechanically deboned chicken meat : Research note / F. Perlo, P. Bonato, G. Teira, R. Fabre, S. Kueider // Meat science. – 2006. – № 72(4). – P. 785–788.
12. Damez J.-L. Meat quality assessment using biophysical methods related to meat structure / J.-L. Damez, S. Clerjon // Meat Science. – 2008. – № 80.1. – P. 132–149.
13. Molette, C. Babile. Effect of rate of pH fall on turkey breast meat quality / C. Molette, H. Remignon and R. Babile // Br Poult Sci 44.44 (2003): – P. 787–788.
14. Желіба Ю.О. Математичне моделювання характеристик процесів охолодження свинини у напівтушах / Ю.О. Желіба, С.В. Харченко, М.В. Оніщенко // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 116 (2). – С. 73–78.
15. Сидоренко О.В. Прогнозування структурних характеристик чорноморської акули катран залежно від імпульсу сили деформації / О.В. Сидоренко, Н.О. Боліла, Н.П. Форостяна // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. – (Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях). – Харків : ХПІ, 2016. – № 42 (1214). – С. 205–210.
16. Одарченко М.С. Випікання тіста та взаємозв'язок вологості та теплопровідності готових виробів / М.С. Одарченко, А.М. Сесь, В.І. Михайлик, О.В. Резвіна // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2006. – Вип. 1. – С. 309–313.

17. Коваль О. Кінетична теорія моделювання якості й прогнозування терміну придатності харчових продуктів / О. Коваль, В. Гуць // Товари і ринки. – 2008. – № 2. – С. 67–74.
18. Кравченко О.І. Зміна властивостей пшеничного тіста під впливом дієтичної добавки Глюкорн 100 / О.І. Кравченко, Г.М. Лисюк, С.Г. Олійник // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі 1 (2011). – С. 180–186.
19. Shapoval Svetlana. Improved method to determine structural-mechanical properties of turkey meat at axial deformation / S. Shapoval // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 1.10 (85) 2017. – P. 63–69.
20. Антюшко Д. Реологічні властивості продуктів для ентерального харчування / Д. Антюшко, Ю. Мотузка, Р. Романенко // Товари і ринки. – 2013. – № 1. – С. 125–130.
21. Кравченко М. Кінетика процесу сушіння рибного концентрату із атерини чорноморської / М. Кравченко, С. Шаповал, І. Данилюк // Товари і ринки. – 2017. – № 1. – С. 131–139.
22. Малецька К.Д. Теплофізичні основи створення нових технологій та удосконалення техніки збезводнювання рідинних матеріалів у диспергованому стані : дисертація д-ра техн. наук: 05.14.06 / НАН України ; Ін-т технічної теплофізики. – Київ, 2003.
23. Orlova N. Impact of canning method to structural and mechanical properties fruits and vegetables / N. Orlova, I. Kuzmenko, R. Romanenko // Ukrainian Journal of Food Science. – 2015. – № 3, 2. – P. 225–233.
24. Федорова Д. Кінетика процесу сушіння та якість рибних напівфабрикатів / Д. Федорова, Р. Романенко // Товари і ринки. – 2016. – № 2. – С. 158–177.

25. Shapoval S. The Study of Changes in the Structural and Mechanical Properties of Turkey Fillet During Storage / S. Shapoval // EUREKA : Life Sciences. – № 1. – 2017. – P. 3–11.
26. Kalkman Cor J. LabVIEW: a software system for data acquisition, data analysis, and instrument control / Cor J. Kalkman // Journal of clinical monitoring. – № 11.1. – 1995. – P. 51–58.
27. Soscia W. Microphacoemulsification with WhiteStar: a wound-temperature study / W. Soscia, James G. Howard, J. Olson Randall // Journal of Cataract & Refractive Surgery. – № 28.6. – 2002. – P. 1044–1046.
28. Сайт специфікацій модулів компанії National Instruments [Електронний ресурс] // Приборы «все в одном» VirtualBench. – Режим доступу : <http://www.ni.com/ru-ru/shop/select/virtualbench-all-in-one-instruments-category>
29. Сайт специфікацій вимірювальних платформ компанії National Instruments [Електронний ресурс] // What Is CompactDAQ?. – Режим доступу : <http://www.ni.com/compactdaq/whatis/>
30. Петрова М.А. Цифровые лаборатории компании Phywe: «Cobra-3», «Cobra-4» / М.А. Петрова // Вестн. Перм. гос. гуманитар.-пед. ун-та. – (Сер.: Информ. компьютерные технологии в образовании). – 2010. – № 6. – С. 126–136.
31. Parajani, Blerina, Teuta Dilo, and Partizan Malkaj. Determination of thermal conductivity, and heat resistance of some polyurethane rubbers, and their dependence from the thickness and density // The 1st International Conference on Research and Education – Challenges Toward the Future (ICRAE2013), 24–25 May 2013, University of Shkodra «Luigj Gurakuqi», Shkodra, Albania.
32. Сайт специфікацій обладнання компанії Phywe [Електронний ресурс] // Product details cobra. – Режим доступу : <https://www.phywe.com/en/cobra4-mobile-link-2-incl-accessories-battery-usb-cable-charger-and-sd-memory-card.html>

33. Універсальний вимірювальний прилад. Датчики [Електронний ресурс] // ТОВ «Фірма ІТМ». – Режим доступу : <http://itm.com.ua/datchiki>
34. Шаповал С.Л. Датчик для дослідження теплофізичних властивостей харчових продуктів / С.Л. Шаповал // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 1(4). – С. 45–49.
35. Crattelet J. On-line local thermal pulse analysis sensor to monitor fouling and cleaning: Application to dairy product pasteurisation with an ohmic cell jet heater / J. Crattelet, S. Ghnimi, P. Debreyne, I. Zaid, A. Boukabache, D. Esteve, L. Auret, L. Fillaudeau // Journal of Food Engineering, Volume 119, Issue 1, November 2013, Pages 72–83.
36. Reyes-Romero D.F. Dynamic thermal sensor for biofilm monitoring / D.F. Reyes-Romero, O. Behrmann, G. Dame, G.A. Urban // Original Research Article Sensors and Actuators A: Physical, Volume 213, July 2014, P. 43–51.
37. Sundeen J.E. Thermal sensor properties of cermet resistor films on silicon substrates / J.E. Sundeen, R.C. Buchanan // Original Research Article Sensors and Actuators A: Physical, Volume 90, Issues 1–2, May 2001, P. 118–124.
38. Huang L. Simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of food and agricultural materials using a transient plane-source method / L. Huang, Lin-Shu Liu // Journal of Food Engineering, Volume 95, Issue 1, November 2009, Pages 179–185.
39. Jungreuthmayer C. Detailed heat and fluid flow analysis of an internal permanent magnet synchronous machine by means of computational fluid dynamics / C. Jungreuthmayer, T. Bauml, O. Winter more authors // Industrial electronics. – 2011. – № 59, Issue: 12. – P. 4568–4578.

-
-
40. Device search: Датчики измерения температуры, виды, устройство, принцип работы термодатчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.devicesearch.ru/article/datchiki-temperature>
 41. Зеленов Г. Измерение температуры р–n переходом / Г. Зеленов // Современная электроника. – 2007. – № 2. – С. 38.
 42. Radiostorage.net. Радиоэлектроника, схемы, статьи и программы для радиолюбителей: Совершенный линейный диодный датчик температуры [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://radiostorage.net/?area=news/2380>
 43. ТУ У 32.3-30591280-001-2004. Універсальний вимірювальний прилад. Технічні умови. – Введ. 2004. – Харків : Сігма, 2004. – 38 с.
 44. Лимаренко А.М. Экспериментальные методы исследования в механике : учеб. пособие / А.М. Лимаренко, Г.А. Оборский, Н.Г. Сурьянинов ; под. общ. ред. Н.Г. Сурьянинова. – Одесса : Астропринт, 2011. – 544 с. – (Унив. кн.).
 45. Шаповал С.Л. Дослідження структурно-механічних властивостей пружнов'язких тіл методом осьової деформації / С.Л. Шаповал // Товари і ринки. – 2016. – № 2. – С. 57–65.
 46. Малкин А.Я. Реология. Концепции, методы, приложения : монография / А.Я. Малкин, А.И. Исаев. – М. : Профессия, 2007. – 560 с.
 47. Горбатов А.В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А.В. Горбатов. – М. : Легкая пром-сть, 1982. – 286 с.
 48. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М. : Лёгкая и пищевая пром-сть, 1981. – 216 с.

49. Николаев Б.А. Структурно-механические свойства мучного теста : монография / Б.А. Николаев. – М. : Легкая пром-сть, 1976. – 247 с.
50. Снигерева И.А. Современные методы исследования качества пищевых продуктов / И.А. Снигерева. – М. : Экономика, 1976. – 222 с.
51. Кучерук І.М. Загальний курс фізики : навч. посіб. для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик ; за ред. І.М. Кучерука. – Київ : Техніка, 1999. – Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. – 536 с.
52. Михалевич В.М. Моделювання напружено-деформованого та граничного станів поверхні циліндричних зразків при торцевому стисненні : монографія / В.М. Михалевич, Ю.В. Добранюк. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 180 с.
53. Shapoval S. Improved method to determine structural-mechanical properties of turkey meat at axial deformation / S. Shapoval // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – № 1.10 (85). – 2017. – P. 63–69.
54. Вірт І.С. Основи механіки руйнування : навч. посіб. для студ. ВНЗ / І.С. Вірт, В.С. Лужецький. – Дрогобич : Ред.-вид. відділ Дрогобиц. держ. пед. ун-ту імені Івана Франка, 2012. – 243 с.
55. Захарченко В.А. Усовершенствование методологии экспертизы пищевых продуктов : дис. 05.18.15 канд. тех. наук / В.А. Захарченко. – Харьков, 2010. – 183 с.
56. Штефан Є.В. Моделювання поведінки дисперсних систем у нерівноважних процесах харчових виробництв / Є.В. Штефан // Наук. пр. УДУХТ. – 2000. – № 8. – С. 63–66.

-
-
57. Штефан Є.В. Експериментальний метод дослідження реологічних властивостей органічних матеріалів – відходів зернової промисловості / Є.В. Штефан, Д.В. Риндюк // Наук. пр. НУХТ. – 2008. – № 25, 42. – С. 106–108.
 58. Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности / А.В. Александров, В.Д. Потапов. – М. : Высш. шк., 1990. – 400 с.
 59. Щеколдин М.И. Экспериментальное исследование удельной теплоемкости мятки, ядра и шелухи хлопковых семян / М.И. Щеколдин, Б.С. Бигельман // Тр. ВНИИЖ. – 1960. – Вып. 20. – С. 137–144.
 60. Азаров Б.М. Инженерная реология пищевых продуктов / Б.М. Азаров, В.А. Арет. – М. : МТИПП, 1978. – 112 с.
 61. Assender H. How Surface Topography Relates to Materials' Properties / H. Assender, V. Bliznyuk, K. Porfyraakis // Science 9 August. – 2002. – Vol. 297. – P. 973–976.
 62. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А.В. Горбатов [и др.]. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 296 с.
 63. Скобельская З. Определение консистенции эмульсий для печенья / З. Скобельская, Т. Вайншенкер // Хлебопродукты. – 2003. – № 6. – С. 18–19.
 64. Николаев Б.А. Измерение структурно-механических свойств пищевых продуктов / Б.А. Николаев. – М. : Экономика, 1964. – 223 с.
 65. Романовський І.Я. Фізика та методи дослідження сировини і матеріалів. Лаб. практикум : навч.-метод. вид. / І.Я. Романовський, Н.П. Дроба, Р.П. Романенко. – Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2010. – Ч. II. – 82 с.
 66. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов : справочник / под ред. А.В. Горбатова. – М. : Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 295 с.

67. Perlo F. Physicochemical and sensory properties of chicken nuggets with washed mechanically deboned chicken meat: Research note / F. Perlo, P. Bonato, G. Teira, R. Fabre, S. Kueider // Meat science. – 2006. – № 72(4). – P. 785–788.
68. Савинок О.Н. Выбор рациональных параметров измерения реологических характеристик цельномышечной ткани говядины методом пенетрации / О.Н. Савинок, В.Д. Косой, В.Г. Гарбуз // Наук. пр. ОНАХТ. – 2015. – № 2(46). – С. 160–163.
69. Ребиндер П.А. Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П.А. Ребиндер. – М. : Наука, 1979. – 378 с.
70. Реология пищевых масс / К.П. Гуськов [и др.]. – М. : Пищевая пром-сть, 1970. – 208 с.
71. Реометрия пищевого сырья и продуктов / Ю.А. Мачихин [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1990. – 180 с.
72. Гуць В. Зміна структурно-механічних властивостей замороженої заливної риби при зберіганні / В. Гуць // Товари і ринки. – 2010. – № 2. – С. 104–112.
73. Рогов И.В. Физические методы обработки пищевых продуктов / И.В. Рогов. – М. : Пищевая пром-сть, 2004. – 84 с.
74. Шалыгина А.М. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А.М. Шалыгина. – М. : Колос, 2002. – 201 с.
75. Реологія в процесах виробництва харчових продуктів : навч. посіб. : у 2 ч. Ч. 1. Класифікація та характеристика неньютонівських рідин / О.І. Черевко, В.М. Михайлов, В.І. Маяк, О.А. Маяк ; Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків : ХДУХТ, 2014. – 244 с.
76. Тищенко Є.В. Харчові жири : підручник / Є.В. Тищенко, П.Х. Пономарьов. – 2-е вид., допов. і перероб. – Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2005. – 227 с.

-
-
77. Экоинструмент. Теория и практика измерения мутности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.ecoinstrument.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=73:service-td&catid=41:supplementinfo&Itemid=81
78. Фридрисберг Д.А. Курс колоидной химии / Д.А. Фридрисберг. – Л. : Химия, 1974.
79. Найденко В.І. Фізика та методи дослідження сировини і матеріалів : навч. посіб. / В.І. Найденко. – Київ : Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2004. – 509 с.
80. Якість води. Визначення каламутності – Національний стандарт України (ISO 7027:1999) / пер. та наук.-техн. ред. П. Хоружий [та ін.]. – Київ : Держспоживстандарт України, 2004. – 8 с.
81. Шаповал С. Визначення каламутності дисперсних систем лазерним випромінюванням. Товари і ринки / С. Шаповал, Р. Романенко, Н. Форостяна. – 2011. – № 2. – С. 95–104.
82. Мерленко О.М. Програмно-апаратний комплекс для визначення масової концентрації хімічних елементів на базі атомно-абсорбційного спектрофотометра моделі С115М1 / О.М. Мерленко, О.М. Решетило // Міжвузівський зб. ; Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2011. – № 5. – С. 184–189.
83. Деклараційний патент на корисну модель № 73282, А, Україна, G01N33/02. Спосіб визначення прозорості (каламутності) желейної продукції / О.В. Сидоренко, Р.П. Романенко, А.О. Туницька, О.В. Романенко. – № U2011 13150 ; заявл. 08.11.2011.
84. Rodríguez A. Effect of chill storage under different icing conditions on sensory and physical properties of canned farmed salmon / A. Rodríguez, N. Carriles, Santiago P. Aubourg // International Journal of Food Science & Technology. – 2010. – № 2. (Volume 45). – P. 295–304.

85. Тубол Т.П. К вопросу о влиянии способа производства стерилизованных консервов из морского гребешка на формирование их качества / Т.П. Тубол, А.Б. Косолапов // Вестник ТГЭУ. – 2011. – № 4. – С. 74–81.
86. Ходаков Г.С. Седиментационный анализ высокодисперсных систем / Г.С. Ходаков, Ю.П. Юдкин. – М., 1981.
87. Сидоренко О.В. Прогнозування сенсорних показників структуроутворювачів на основі вторинної рибної сировини / О.В. Сидоренко, А.О. Туницька // Товарознавчий вісн. – 2012. – № 5. – С. 352–357.
88. Романенко О.В. Залежність градієнта каламутності заливки рибних пресервів від температури зберігання. Обладнання та технології харчових виробництв / О.В. Романенко. – 2014. – № 32. – С. 218–225.
89. Мороз І.О. Методи термодинаміки : навч. посіб. для студ. ВНЗ України / І.О. Мороз. – Суми : СумДПУ імені А.С.Макаренка, 2009. – 192 с.
90. Беляев Н.М. Основы теплопередачи / Н.М. Беляев. – Киев : Вища шк., 1989. – 343 с.
91. Теоретические основы теплофизики. Теплотехнический эксперимент : справочник / под общ. ред. чл.-корр. АН СССР В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. ; ил. – (Теплоэнергетика и теплотехника ; Кн. 2).
92. Копійка О.К. Фізика теплопередачі / О.К. Копійка, В.В. Калінчак, В.В. Головка. – Одеса : Маяк, 2004. – 44 с.
93. Михайлова Г. Теплозахисні властивості ковдр із об'ємними наповнювачами / Г. Михайлова, Н. Форостяна // Товари і ринки. – 2016. – № 1. – С. 96–105.
94. Камья Ф.М. Импульсная теория теплопроводности / Ф.М. Камья. – М. : Энергия, 1972. – 271 с.

-
-
95. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. – М. : Агропромиздат, 1987. – 272 с.
 96. Constenla D.T., Lozano J.E., Czapiste G.H. // Journal of Food. – Science Volume 54. – Issue 3. – P. 663–668, May 2001.
 97. Холодильна технологія харчових продуктів : навч. посіб. / М.М. Масліков. – Київ : НУХТ, 2007. – 335 с.
 98. Беляева М.А. Математическое моделирование технологических процессов пищевых производств / М.А. Беляева. – Ташкент : Изд-во Ташкентского хим.-технолог. ин-та, 2003. – 169 с.
 99. Желіба Ю.О. Математичне моделювання характеристик процесів охолодження свинини у напівтушах / Ю.О. Желіба, С.В. Харченко, М.В. Оніщенко // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 116 (2). – С. 73–78.
 100. Желіба Ю.О. Дослідження процесів охолодження яловичини в напівтушах / Ю.О. Желіба, С.В. Харченко, М.В. Оніщенко // Холодильная техника и технология. – 2008. – № 114 (4). – С. 54–58.
 101. Попов В.В. Методи обчислень : консп. лекцій для студ. мех.-мат. ф-ту / В.В. Попов. – Київ : Київ. ун-т, 2012. – 303 с.
 102. Рвачев В.Л. Метод R-функций в задачах теории упругости и пластичности / В.Л. Рвачев, Н.С. Синекон. – Київ : Наук. думка, 1990. – 216 с.
 103. Потапов В.О. Наближена модель динаміки теплообмінних процесів / В.О. Потапов, О.С. Сомов // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства та торгівлі : зб. наук. пр. – 2008. – Вип. 1(7). – С. 380–388.

104. Стариков В.В. Влияние инфракрасного и сверхвысокочастотного нагрева на микро- и макроэлементы говяжьего мяса / В.В. Стариков, М.А. Беляева // Все о мясе. – 2004. – № 4. – С. 20–22.
105. Шидловский С.В. Математическое моделирование сложных объектов с распределенными параметрами в задачах автоматического управления структурно-перестраиваемых систем / С.В. Шидловский // Известия ТПУ. – 2006. – № 8. – С. 19–23.
106. Випікання тіста та взаємозв'язок вологості та теплопровідності готових виробів / М.С. Одарченко, А.М. Сесь, В.І. Михайлик, О.В. Рєзвіна // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі. – 2006. – Вип. 1 – С. 309–313.
107. Hemmleb M. Photogrammetrische Auswertung Elektronenmikroskopischer Bilddaten / M. Hemmleb // Dissertation, eingereicht in der Fakultät 6 der Technische Universität. – Berlin, 2002. – P. 142–148.
108. Sinram O. Calibration of an SEM, using a nano positioning tilting table and a microscopic calibration pyramid / O. Sinram, M. Ritter, S. Kleindiek // ISPRS Commission V Symp. Close-Range Vision Techniques. – Corfu, Greece, 2002. – P. 210–215.
109. Захарко Я.М. Аналіз мікроструктури глинистих мінералів Сумської області / Я.М. Захарко, С.Б. Большанина, В.Д. Дудченко // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». – 2008. – № 609 : Хімія, технологія речовин та їх застосування. – С. 239–242.
110. Шаповал С. РЕМ-фотограмметрія в експрес-діагностиці теплофізичних властивостей товарів / С. Шаповал, Р. Шевченко // Товари і ринки. – 2014. – № 2. – С. 36–45.

111. Педан А.Д. Дослідження рельєфу поверхні біологічних мікрооб'єктів в ультрафіолетовому сканувальному телевізійно-оптичному мікроскопі / А.Д. Педан, Б.І. Любинецька // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». – 2011. – № 705 : Радіoeлектроніка та телекомунікації. – С. 84–89.
112. Гаврилова Н.Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов : учеб. пособие / Н.Н. Гаврилова, В.В. Назаров, О.В. Яровая. – М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2012.
113. Уроки paint.net для новичков: Как в paint.net сделать рисунок с прозрачным фоном? [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://paint-net.ru/?id=38>
114. Кларк Э.Р. Микроскопические методы исследования материалов / Э.Р. Кларк, К.Н. Эберхардт. – М. : Техносфера, 2007. – 376 с.

Наукове видання

ШАПОВАЛ Світлана Леонідівна,
РОМАНЕНКО Роман Петрович,
ФОРОСТЯНА Нінель Петрівна

ДІАГНОСТИКА ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Монографія

Редактор Т.В. Москалюк
Комп'ютерне верстання К.М. Похилюк
Дизайн обкладинки Н.Ю. Слінкіної

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 9,92. Тираж 300 пр. Зам. 1740.

Видавець і виготовлювач

Київський національний торговельно-економічний університет
вул. Кіото, 19, м. Київ-156, Україна, 02156

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 4620 від 03.10.2013 р.