

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/282649472>

Rheological methods of raw foods and automation of payments rheological characteristics

Book · October 2006

DOI: 10.13140/RG.2.1.1.2739.7847

CITATIONS

3

READS

2,803

1 author:



[Andrii Goralchuk](#)

Toronto Metropolitan University

25 PUBLICATIONS 83 CITATIONS

SEE PROFILE

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський державний університет харчування та торгівлі

А.Б. Горальчук, П.П. Пивоваров, О.О. Гринченко, М.І. Погожих,
В.В. Полевич, П.В. Гурський

**РЕОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СИРОВИНИ
І ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ
РОЗРАХУНКІВ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Рекомендовано до друку Президією науково-методичної комісії з торгівлі
Міністерства освіти і науки України як навчальний посібник

Харків 2006

УДК [532.135:664](075.8)

Горальчук А.Б. та ін. Реологічні методи дослідження сировини і харчових продуктів та автоматизація розрахунків реологічних характеристик: Навчальний посібник / А.Б.Горальчук, П.П.Пивоваров, О.О. Гринченко, М.І. Погожих, В.В. Полевич, П.В. Гурський/ Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Харків, 2006. – 63 с.: іл.; табл.
Бібліогр.: 27 назв.

ISBN 996 – 405 – 031 – 8

Наведено методи дослідження сировини та харчових продуктів. Описано конструкції та галузі використання реометрів, методики досліджень. Наведено питання теорії реології та узагальнюючу термінологію реологічних показників. Запропоновано методи автоматизованої обробки експериментальних даних.

Для студентів технологічного, товарознавчого та механічного факультетів, а також інженерно-технологічних працівників, аспірантів.

Рецензенти:

д-р. техн. наук, проф. Ковбаса В.І.

д-р. хім. наук, проф. Торяник О.І.

Рекомендовано до друку Президією науково-методичної комісії з торгівлі Міністерства освіти і науки України, протокол № 28 від 17.10.2006 р.

ISBN 996 – 405 – 031 – 8

© А.Б.Горальчук, П.П.Пивоваров, О.О. Гринченко, М.І. Погожих, В.В. Полевич, П.В. Гурський, 2006

© Харківський державний університет харчування та торгівлі, 2006

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
ВСТУП	5
1. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЇ.....	8
2. ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ ЯК РЕОЛОГІЧНІ ТІЛА	16
3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ РЕОЛОГІЇ І ТЕОРІЇ НАПРУЖЕНОГО ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАНУ	18
3.1 Властивості рідиноподібних систем.....	19
3.2 Властивості твердоподібних систем.....	26
4. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИРОВИНИ ТА ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ.....	31
4.1 Ротаційний віскозиметр сталої напруги зсуву ВПН – 0,2М.....	31
4.2 Ротаційний віскозиметр типу RN.....	33
4.3 Реовіскозиметр Геплера.....	36
4.4 Плоскопаралельний еластопластометр Толстого.....	38
4.5 Модифіковані ваги Каргіна-Соголової.....	42
4.6 Пенетрометр “Labor”.....	45
5. ВИКОРИСТАННЯ ТАБЛИЧНОГО РЕДАКТОРА EXCEL ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ РЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	48
5.1. Математично-статистична обробка результатів реологічних досліджень	48
5.2 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на ротаційному віскозиметрі ВПН-0,2М	52
5.3 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на ротаційному віскозиметрі типу RN	58
5.4 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на реовіскозиметрі Геплера	60
5.5 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на модифікованих вагах Каргіна-Соголової та еластопластометрі Толстого.....	62
5.6 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на пенетрометрі “Labor”	67
ЛІТЕРАТУРА	70

ПЕРЕДМОВА

Сьогодні жодне із технологічних досліджень, чи то вивчення функціонально-технологічних властивостей нових харчових інгредієнтів, чи то розробка нових або вдосконалення існуючих технологій продуктів харчування, не може бути виконаним без використання інструментальних методів дослідження, зокрема, реологічних і математичних методів обробки експериментальних даних.

В існуючому різноманітті підручників, довідників, науково-практичних посібників детально викладено основи реології харчових дисперсних систем, описано конструкції та принципи дії найбільш розповсюджених реометрів, методики вимірювань і розрахунків. Природно виникає питання: чи доцільно написання ще одного методичного посібника на цю тему?

Деякі міркування переконали нас у тому, що це просто необхідно.

По-перше, для визначення реологічних характеристик харчових дисперсних систем використовуються різні прилади і методи дослідження, що найчастіше призводить до одержання міжметодних розбіжностей і результатів, що неможливо порівняти. Тому виникає необхідність вибору найбільш надійних, відтворюваних і доступних для більшості дослідників методик.

По-друге, студенти інженерних факультетів у межах академічних курсів недостатньо ознайомлюються з методами експериментальної реології, правилами проведення експериментів і математичної обробки експериментальних даних, а прикладні програми, які дозволяють автоматизувати робоче місце дослідника, тільки починають з'являтися.

Тому виникає необхідність у створенні методичного посібника, в якому лаконічно та просто викладались би основні положення реології, були б описані деякі інструментальні методи, що найбільш часто використовуються для дослідження реологічних показників, а також математичні методи обробки експериментальних даних з використанням предметно орієнтованих програмних засобів, один з яких табличний редактор Microsoft Excel – простий і доступний.

Уважаємо за необхідне відмітити, що багатьох важливих питань в даному методичному посібнику навіть не торкалися. На думку авторів надмірне розширення розглянутих питань знизить її практичну корисність.

Оскільки даний методичний посібник певною мірою є першим досвідом в інтеграції знань окремих дисциплін – технології, фізики, математики, інформаційних технологій тощо, він неминуче містить недоліки. Автори будуть вдячні за всі зауваження і побажання, висловлені користувачами даного посібника, за адресою: rheologi@rambler.ru

ВСТУП

Харчові продукти, достатньо складні за хімічним складом, мають певні властивості, які в сукупності визначають якість продукції. Існуючі сьогодні методи оцінки якості продуктів часто суб'єктивні й потребують досконалості. Знання про фізичні властивості продуктів необхідні для проектування машин і апаратів, тому необхідно суворо дотримуватися методик вимірювання та досліджень цих властивостей.

Найбільш повно можна судити про якість продукту враховуючи їх фізичні властивості, які корелюють з хімічним складом, і визначаються внутрішньою будовою продукту. При цьому характеристики сировини визначають основні показники готових продуктів.

Завданням реології як науки про плин і деформацію реальних тіл (технічна механіка реальних тіл або дисперсних систем) є вивчення властивостей існуючих продуктів і розробка методів розрахунку процесів плинності їх у робочих органах машин. До функцій фізико-хімічної механіки як науки про способи й закономірності формування структур дисперсних систем входять встановлення механізмів утворення й руйнування структур у дисперсних і нативних системах залежно від сукупності фізико-хімічних, біохімічних, механічних та інших чинників, а також дослідження, обґрунтування й оптимізація шляхів одержання структур із заздалегідь заданими технологічними властивостями.

Реометрія (експериментальна реологія) посідає значне місце в практиці технологічних лабораторій підприємств харчування, науково-дослідних організацій і за допомогою спеціальних приладів та пристроїв слугує для визначення різних структурно-механічних характеристик харчових матеріалів.

Фізико-механічні властивості харчової сировини, напівфабрикатів і продуктів досить різноманітні й залежать від багатьох чинників: температури, вологості, тривалості й інтенсивності механічного й теплового впливу, способу й терміну зберігання, умов транспортування тощо. У зв'язку з цим у літературі можна зустріти для одного й того самого харчового продукту різні за величиною характеристики, що пов'язано з недотриманням умов досліджень, застосуванням різних методик визначення й приладів для них.

Існують об'єктивні труднощі щодо дотримання умов проведення вимірів, тому у відомостях про реологічні характеристики продуктів необхідно вказувати, яким методом, з якими параметрами і на яких приладах отримані ті або інші дані.

У реології й інженерній фізико-хімічній механіці широко використовують методи дослідження, які за підходом до узагальнень поділяються на:

- диференціальні;
- інтегральні;

- аналогій і моделей;
- аналізу розмірностей;
- експериментальні.

При цьому, як правило, ґрунтуються на моделях, що розглядають матеріал як макроскопічну систему у вигляді суцільного середовища, що піддається деформації. Мірами рухливості часток такої системи є амплітуда й швидкість зсуву з безперервним розподілом основних фізичних властивостей і деформацій. Такий підхід дозволяє не розглядати складні молекулярні рухи в тілах і використати для опису процесів апарат математичного аналізу, що застосовується до безперервних функцій. Кожний з перерахованих методів, за винятком експериментального, можна здійснювати теоретико-феноменологічними й експериментальними способами. У межах одного дослідження можливі комбінації методів.

Диференціальний метод використовують під час вивчення нескінченно малих відхилень величин від рівноважних, що дає можливість у феноменологічних дослідженнях скласти диференціальні рівняння; в експериментальних роботах вивчають зміну параметрів окремих елементів тіла в будь-якому процесі. Таким чином, диференціальний метод дозволяє визначити в теоретичних і експериментальних дослідженнях стан величин, змінних у часі й просторі (для будь-якого моменту часу й будь-якої точки простору).

Інтегральним методом вивчають скінченні величини. Він дає можливість визначити сумарний ефект зміни параметрів у системі під дією тих або інших чинників. Як правило, теоретичні розрахункові формули одержують у результаті інтегрування диференціальних рівнянь, емпіричні – у результаті сумарного врахування диференціальних змін у системі. Ті й інші рівняння дозволяють описати процес зміни параметрів від початкового до кінцевого стану.

Метод аналогій використовують досить широко в багатьох якісних і кількісних дослідженнях. Він дозволяє скласти рівняння для реальних об'єктів за аналогією з рівняннями для ідеальних. Ґрунтуючись на універсальності диференціальних рівнянь, можна вивчати складні явища за допомогою більш простих ідеальних (модельних) процесів.

У реології широко розповсюджений метод механічних моделей. Наприклад, для одержання наочної картини поведінки матеріалу під дією напруг кожен його властивість (пружність, пластичність та ін.) заміняють механічним елементом (пружиною, парою тертя ковзання тощо). У реології також широко використовують геометричне, математичне, фізичне й інше моделювання. Недолік методу аналогій полягає в тому, що ним важко користуватися під час дослідження складних внутрішніх взаємодій. Фізичне моделювання ефективне для одержання якісних і кількісних відповідностей натурним об'єктам.

Загальновизнаною теорією експериментальних досліджень є теорія подібності, що трактує умови подоби фізичних явищ і методи визначення цих умов, а в деяких випадках дозволяє розробити методику експерименту й

визначити підхід до нього. Подібні явища повинні мати однакові й чисельно рівні критерії, у серед яких і отримані із граничних і початкових умов.

Метод аналізу розмірностей застосовують для складання критеріальних рівнянь під час обробки експериментальних даних. Розробляючи методику експерименту, визначивши залежні й незалежні змінні й функціональну залежність між критеріями, можна встановити необхідні межі зміни останніх.

Експериментальний метод обов'язковий за умов повних досліджень для одержання всіх розрахункових залежностей і формул. Тільки в результаті експерименту можна визначити границі використання диференціального або інтегрального рівняння, знайти для теоретичних або емпіричних рівнянь коефіцієнти, що характеризують специфічність дослідного об'єкту, перевірити теоретичні положення на практиці та встановити зв'язок теорії з практикою.

Будь-які виміри, як би ретельно їх не проводили, не можуть дати двох абсолютно тотожних результатів. Завжди можливе накладення яких-небудь побічних явищ, у результаті чого виникають похибки. Відхилення вимірювальної величини від істинної становить абсолютну похибку. Крім того, подальшу аналітичну й графічну обробку експериментів проводять із певним ступенем точності на ЕОМ. Підрахунок похибки експерименту дозволяє встановити заздалегідь припустиму похибку обчислень. Основним завданням теорії похибок є розробка способів одержання й обробки результатів, за яких похибки будуть мінімальними, а величина, яку визначають, найбільш достовірною. Для попереднього рішення цього завдання оцінюють похибки й погрішності. Вимірюють низку величин, що складають розрахункову формулу, а також загальну похибку вимірювань за цією формулою. Випадкові помилки, що виникають під час вимірювання, можна значно зменшити за умов багаторазового повторення вимірювань (5 та більше разів).

1. ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ РЕОЛОГІЇ

Аналіз опублікованих робіт [1;3;5-7;13;14;16;21;23] показує, що їх автори не завжди дотримуються єдиної термінології, фізичного сенсу вимірюваних величин, що ускладнює розуміння і використання одержаних результатів. Тому вважаємо за необхідне навести перелік основних термінів реології.

Таблиця 1.1 – Терміни та їх фізичний сенс

Термін	Позначення	Визначення та фізичний сенс
1	2	3
Нормальне напруження ¹ (розтягу, стиснення), Па	σ	Напруження, що діє по нормалі до поверхні матеріалу
Дотичне напруження ¹ (напруження зсуву), Па	τ	Напруження, що діє по дотичній до поверхні матеріалу
Граничне напруження зсуву, Па	τ_0	Мінімальне дотичне напруження, яке необхідне для здійснення зсуву (зміщення шарів матеріалу один відносно одного в напрямку дії прикладеної сили). Напруження, що призводить до незворотної деформації
Абсолютна деформація розтягу або стиснення, м	Δl	Зміна розмірів матеріалу під час розтягування або стиснення, що відбувається під дією нормальних сил. Може бути позитивною або від'ємною
Абсолютна деформація зсуву, м	Δe	Зміна відстані між протилежними точками в сусідніх шарах тіла, що відбувається під час зміщення шарів під дією дотичних сил
Відносна деформація, ² відносні одиниці (в.о.)	ε або γ	Відносна деформація, що виникає в тілах під час прикладення напруги. Визначається відношенням абсолютної деформації до розміру матеріалу (до моменту прикладення навантаження)
Умовно-пружна деформація (пружна умовно-миттєва), в.о.	ε_0 або γ_0	Відносна деформація, яка виникає в неабсолютно твердих тілах та зникає після зняття напруження за дуже короткий проміжок часу

Вискоеластична деформація, в.о.	$\epsilon_{\text{вс}}$ або $\gamma_{\text{вс}}$	Відносна деформація, яка виникає за умов напруження та зникає під час зняття напруження не миттєво, а за певний проміжок часу
Продовження таблиці 1.1		
1	2	3
Зворотна деформація, в.о.	$\epsilon_{\text{зв}}$ або $\gamma_{\text{зв}}$	Повністю зворотна відносна деформація. Є сумою умовно-миттєвої та вискоеластичної деформації
Незворотна деформація в.о.	$\epsilon_{\text{незв}}$ або $\gamma_{\text{незв}}$	Незворотна відносна деформація, що виникає внаслідок розвитку пластичних деформацій матеріалу
Максимальна деформація, в.о.	$\epsilon_{\text{м}}$ або $\gamma_{\text{м}}$	Максимально досягнута відносна деформація під дією прикладеної сили
Залишкова деформація, в.о.	$\epsilon_{\text{зал}}$ або $\gamma_{\text{зал}}$	Відносна деформація, яка не зникає після зняття прикладеної напруги протягом нескінченно довгого проміжку часу
Період релаксації, с	Θ	Проміжок часу, за який деформація матеріалу після зняття напруження зменшується в e разів. Визначається відношенням в'язкості до модуля пружності
Ньютонівська в'язкість (динамічна в'язкість), Па·с	η	Коефіцієнт, що характеризує внутрішнє тертя, а саме зв'язок між силою, що діє на одиницю площини сусідніх шарів рідини, та градієнтом швидкості їх відносного руху. Динамічна в'язкість не залежить від швидкості зсуву тільки для ньютонівських рідин. Внутрішнє тертя в рідинах обумовлене силами зчеплення між молекулами та є переносом імпульсу між шарами
Ефективна в'язкість, Па·с	$\eta_{\text{еф}}$	Коефіцієнт в'язкості неньютонівських рідин. Залежить від швидкості зсуву
Кінематична в'язкість, м ² /с	ν	Коефіцієнт, що визначається як відношення динамічної (ефективної) в'язкості до густини рідини

В'язкість структурованих систем або пластична в'язкість (шведівська), Па·с	η_0^*	Коефіцієнт, що характеризує властивість матеріалу структурованого стану текти без руйнування під дією постійного напруження
В'язкість пружної післядії, Па·с	$\eta_{пр}$	Коефіцієнт, що характеризує внутрішнє тертя з градієнтом швидкості, що відповідає області пружної деформації

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Модуль миттєвої пружності, ³ Па	$E_{пр}$ або $G_{пр}$	Здатність тіла чинити опір пропорційно його деформації
Модуль еластичності, Па	$E_{ел}$ або $G_{ел}$	Здатність тіла, що характеризує зникнення деформації з часом після зняття напруження
Швидкість зсуву, c^{-1}	$\dot{\gamma}$	Відносна швидкість шарів рідини на одиницю відстані між ними
Піддатливість, $Па^{-1}$	I	Здатність тіла до деформації під дією прикладеного напруження
Пружність, %	Пр	Здатність тіла повертатися до початкового стану після припинення дії напруження
Пластичність, %	Пл	Здатність тіла незворотно і без руйнування змінювати свою форму під дією великих напружень. Матеріал пластичний, якщо Пл > 50%
Еластичність, %	Ел	Здатність тіла до значної післядії за умов постійного напруження. У тілі, деформованому в межах пружності, під час зняття напруження спостерігається повне зникнення деформації, яке відбувається не миттєво, а розвинуто в часі

Примітки:

1. Напруження, що діє по нормалі до поверхні матеріалу, прийнято позначати через σ , під час дії напруження по дотичній – τ .

2. Деформацію розтягу (стиску), що розвивається під час дії напруження по нормалі до поверхні матеріалу, прийнято позначати через ϵ , під час дії напруження по дотичній, деформацію зсуву – γ .

3. Модуль миттєвої пружності та еластичності під час дії напруження по нормалі до поверхні матеріалу прийнято позначати через E , під час дії напруження по дотичній – G .

Тиксотропність – здатність макроскопічної системи до самостійного відновлення структури після її руйнування.

Реопексивність – здатність макроскопічної системи до зміцнення структури з часом за умов механічної дії на тіло з постійною швидкістю деформації зсуву.

Твердість – загальна властивість негуківських тіл чинити опір проникненню іншого, більш твердого тіла внаслідок пружної та в'язкої деформації. Обумовлена протидією багатьох та різних за природою сил. Тому твердість не можна виразити як фізичну величину з однозначною розмірністю. Вона являє собою деякий параметр, що наводиться у відносних величинах, та залежить від методу вимірювання.

Твердість визначають шляхом занурення тіл різної геометричної форми: кулі (твердість за Бріннелем), конуса (твердість за Роквеллом), піраміди (твердість за Вікерсом).

Коефіцієнт твердості розраховують за величиною сили занурення, залишкової деформації, площі кульового сегменту, глибину занурення тощо [8;18;21].

М'якість – властивість, обернена твердості.

Крихкість – властивість твердих тіл до руйнування без пластичної деформації. У негуківських тіл крихке руйнування настає тільки за високих швидкостей деформації або низьких температур, коли дією в'язкості можна знехтувати.

Когезія – «зминання» поверхневих шарів споріднених за складом та фазами системи або її частини. Визначається як опір утворенню поверхні розділу, пов'язаному з подоланням сил взаємодії між атомами та молекулами для утворення поверхні розділу.

Адгезія – властивість, що ґрунтується на взаємодії поверхневих шарів або фаз двох різних тіл на межі розділу, яка викликає зчеплення тіл. Під час розділення тіл необхідно подолати сили зчеплення. Міцність з'єднання двох тіл з різних матеріалів залежить від площі й стану поверхні контакту між ними.

Липкість – властивість граничного шару в'язких або пластичних матеріалів чинити опір розділенню поверхонь, що перебувають у контакті. Воно ґрунтується на адгезії матеріалів на поверхні розділу й когезії компонентів самого матеріалу.

Зовнішнє сухе тертя – опір відносному переміщенню двох поверхонь твердих тіл, що перебувають у контакті. Для початку ковзання необхідно прикласти навантаження, що перевищує силу тертя спокою.

Консистенція – ступінь густини (твердості) продукту. Залежно від консистенції продукти по-різному деформуються під дією певних видів напруження та швидкості. Результати вимірів, як правило, дають у відносних одиницях, характерних для приладів (консистометрів), що мають спрощену конструкцію. Відтворюваність показників консистенції гарантовано тільки в тому випадку, якщо всі умови вимірів постійні, особливо форма зразка і його розміри, вид навантаження та його швидкість.

Терміни «структура» і «текстура» з'являються під час розглядання органолептичних та структурно-механічних властивостей харчових продуктів, їх іноді плутають один з одним. Ці терміни мають визначені поняття.

Текстура – фізична властивість продукту, яка сприймається органами слуху, зору і дотику і викликає у людини певні відчуття під час споживання (відкушування, розжовування, проковтування) – сенсорна оцінка [8;18;24;25;27].

Сприйняття текстури пов'язане зі структурою харчового продукту [24]. Структура поділяється на чотири рівні, які засновані на візуальній оцінці, – хімічний рівень, рівень електронного мікроскопування, рівень простого мікроскопування та рівень сенсорної оцінки. Структура характеризує геометричне розташування окремих елементів, часток в об'ємі продукту.

Хімічний рівень. Структура зв'язана з молекулами, з яких складається харчовий продукт, та їх взаємодією між собою.

Електронно-мікроскопічний рівень. Даний рівень відноситься до скупчення молекул та їх з'єднання в агломерати.

Рівень простого мікроскопування розглядає ті ж самі сполуки, що й електронно-мікроскопічний рівень, тільки в більшому масштабі.

Сенсорна оцінка розглядає структурні особливості, що можуть бути сприйняті органами відчуття як типи ознак текстури [24].

На сьогодні існує значна кількість різних рівнів структури. Для порівняння приведемо ще одну класифікацію, яка базується на розмірних характеристиках структурних елементів та включає три рівні:

Молекулярна будова (~1...100 нм) на даному рівні досліджують взаємодію окремих молекул.

Мікроструктура (~10нм...100 мкм) проводять дослідження дисперсності емульсій, суспензій та ін.

Макроструктура (~>100 мкм) проводять дослідження кристалів цукру в помадних масах, зовнішнього вигляду та ін.

Всі ці ієрархічно визначені рівні структури визначають повні властивості харчових продуктів, які проявляються у формуванні органолептичних та структурно-механічних властивостей.

Ознаки текстури можуть бути більш детально поділені на різні категорії; їх загальну класифікацію представлено в табл. 1.2.

Органолептичні властивості визначають попит або відсутність попиту на продукт. Для створення високоякісних харчових продуктів необхідно цілеспрямовано впливати на їхні органолептичні властивості. Головним завданням, яке стоїть перед виробниками харчових продуктів, – як точно й об'єктивно визначити текстурні характеристики. Описати текстуру однією величиною, отриманою за допомогою приладу, неможливо, тому для описання текстури використовують до 30 термінів (твердість, м'якість, ніжність, волокнистість і т.д.) [18;19;25].

Консистенція і в'язкість відносяться до текстури і являють собою дві з безлічі можливих її відмінних ознак (рис. 1.1).

Аналізуючи текстуру, визначають кінестетичні ознаки продукту, пов'язані з м'язовими відчуттями.

Інструментальні вимірювальні методи для визначення окремих кінестетичних ознак можна поділити на три групи:

1 – методи точного вимірювання реологічних величин – коефіцієнт в'язкості, межа плинності, модуль пружності, міцність на розтягування та ін.;

2 – емпіричні методи, за яких продукти піддаються відтворюючій деформації або навантаженню за допомогою вимірювальних приладів, що не дозволяють точно визначити реологічні властивості. Результати вимірів являють собою параметри консистенції. Вони добре корелюють з ознаками текстури, отриманими при органолептичній оцінці;

3 – імітаційні методи, за яких харчові продукти в спеціальних вимірювальних приладах піддаються дослідженням, що імітують реальні навантаження під час споживання їжі, наприклад, за допомогою циклічних навантажень імітується процес розжовування проби. Мета такого аналізу текстури – вимір параметрів, що відповідають ознакам текстури продукту, які отримано сенсорними методами.

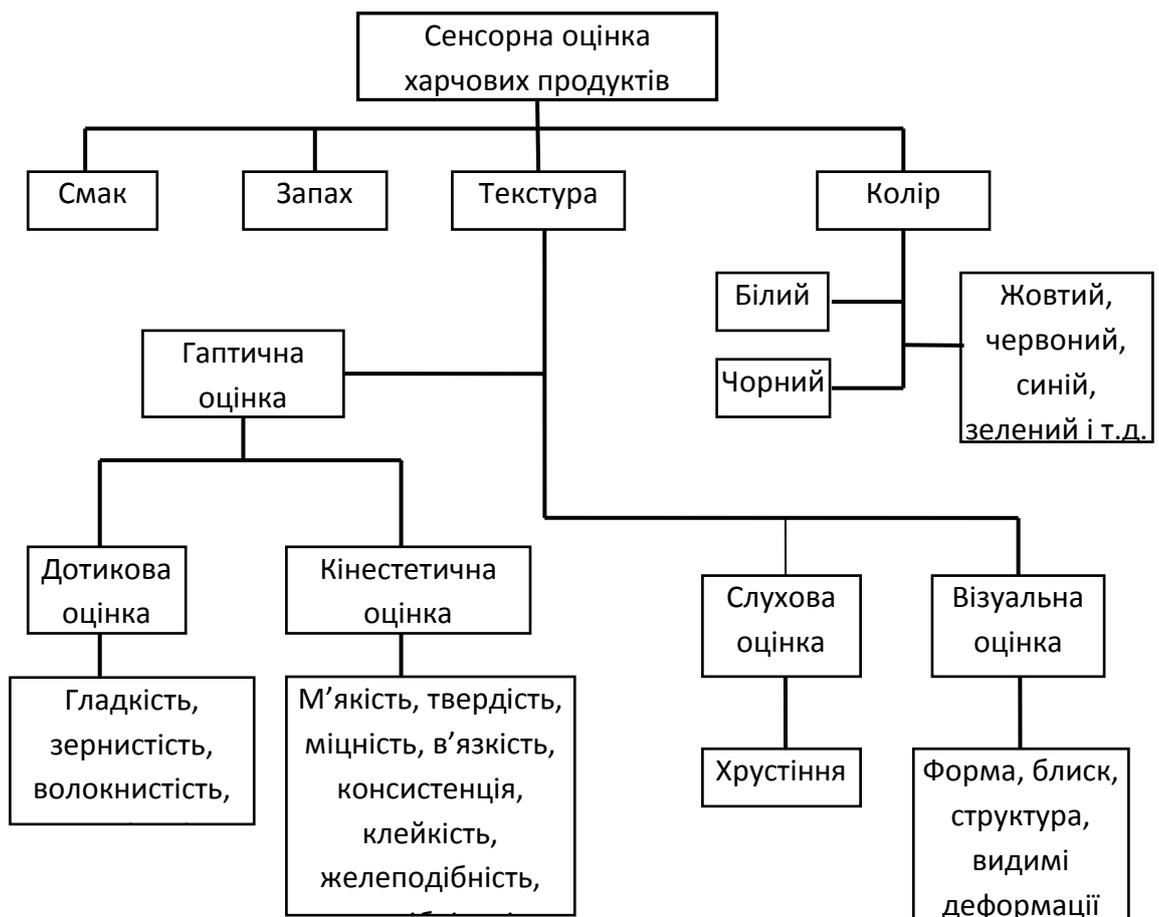


Рисунок 1.1 – Класифікація сенсорної оцінки якості та текстури харчових продуктів (за Боурном) [10;15]

Таблиця 1.2 – Загальна класифікація характеристик текстури харчових продуктів

Текстура	Визначення класу і можливих підкласів	Ознака
1	2	3
за Szczesniak, 1963 [27]		
I Механічні характеристики	Властивості матеріалів, що обумовлені дією прикладеного навантаження	Основні ознаки: твердість, когезійна і адгезійна здатність, в'язкість, еластичність. Другорядні ознаки: крихкість, жувальність, липкість
II Геометричні характеристики	1) Розмір і ознаки пов'язані з формою	Гладкість, пісочність

Продовження таблиці 1.2

1	2	3
	2) Форма і ознаки пов'язані з орієнтацією	М'якість, обрушеність, кристалічність
III Інші характеристики	Дотики пов'язані зі сприйняттям вологості, маслянистості	Маслянистість, сальність, вологість
за Sherman, 1969 [26]		
I Основні характеристики	1) Аналітичні характеристики	
	2) Величина часток і форма, розподіл за дисперсністю	
	3) Пористість (вміст повітря) і розподіл пор за радіусом	
II Вторинні характеристики	Комбінації двох фундаментальних текстурних характеристик	Еластичність, в'язкість, адгезія
III Третинні характеристики	Комбінації двох і більше вторинних ознак	Твердість, крихкість, кремоподібність, липкість
за Jovit, 1974 [24]		
I Загальні текстурні ознаки	Структура, текстура, консистенція	

II Властивості матеріалів до дії прикладеного навантаження		Щільність, твердість, м'якість
III Структура матеріалу	1) Величина часток або форма	Соковитість, висока дисперсність
	2) Профіль і розташування структурних елементів	Волокнистість, обрешенність
IV Дотикові		Соковитість, м'якість

2. ХАРЧОВІ ПРОДУКТИ ЯК РЕОЛОГІЧНІ ТІЛА

Для експериментального визначення реологічних параметрів продуктів або текстурних показників консистенції існує безліч методів, які розрізняються за галуззю застосування (лабораторні або виробничі), видом вимірюваної величини, принципами навантаження, ступенем автоматизації та ін.

Для вибору відповідного методу дослідження необхідно класифікувати харчові продукти за текстурними ознаками. Найбільш розповсюдженою класифікацією харчових продуктів за текстурними ознакам на основі реологічних властивостей подана в (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Класифікація харчових продуктів за реологічними властивостями і текстурними ознаками (за Мачихінім) [9;18]

Дисперсна система	Продукт (серед яких сировина, напівфабрикати)	Типові реологічні властивості	Типові текстурні ознаки
1	2	3	4
Чиста рідина	Вода, спирт, олія	Ньютонівська рідина	Водянистий, рідкий
Чистий розплав	Розплавлені жири (какао-масло), розплавлений цукор	Ньютонівська рідина	Рідкий, густий
Істинний розчин	Розчини солі та цукру, екстракти, пиво, напої	Ньютонівська в'язкість, можливі в'язкопружність, тиксотропія	Рідкий, густий
Колоїдний розчин	Білкові розчини, не прозорі фруктові та ягідні соки	Ньютонівська та неньютонівська в'язкість, тиксотропія, в'язкопружність	Рідкий, густий, слизистий
Рідиноподібна	Суспензії (какао, фруктові та овочеві соки, супи), емульсії (молоко, майонез, вершки)	Ньютонівська та неньютонівська в'язкість, тиксотропія, реопексія в'язкопружність	Рідкий, густий, кремopodobний, тягучий, в'язкотекучий, клейкий
Пастоподібна	Фруктове пюре (яблучний мус), горіховий мус, кисломолочний	Неньютонівська в'язкість, тиксотропія, реопексія	Клейкий, густий, слизистий, тягучий, кашоподібний,

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4
Зв'язана м'яка	Вершкове масло, пінна маса, желе, тісто, йогурт, суп, паштет, картопляне пюре	Пластична в'язкість, зворотна та незворотна тиксотропія, реопексія, в'язкість, в'язкопружність	М'який, той, що мажеться, слизький, кремоподібний, клейкий, пастоподібний, еластичний
Зв'язана напів-тверда	М'якуш хліба, варена ковбаса, варена картопля	Пружність, пластична в'язкість, в'язкопружність	М'який, міцний, гумоподібний, в'язкий
Міцна	Свіжі яблука, груші, картопля,	Пружність, пластична	М'який, міцний, крихкий,

	сир, фарш	в'язкопружність	гумоподібний
--	-----------	-----------------	--------------

	огірки, м'ясо, хлібобулочні продукти тривалого зберігання, шоколад	в'язкість, в'язкопружність	ламкий, в'язкий
Тверда	Карамель, зерно, ядро горіха, макаронні вироби, морква	Пружність, твердість, висока текучість і міцність, крихкість	Міцний, твердий, крихкий, ламкий, склоподібний

Структури дисперсних систем у стані термодинамічної рівноваги за Ребіндером поділяються на дві групи [6;11]:

1 – коагуляційні структури, в яких взаємодія між елементами відбувається через тонкий шар дисперсійного середовища і обумовлена силами Ван-дер-Ваальса. Ці структури можуть виявляти властивості неньютонівських рідин (тиксотропію, реопексію, в'язкопружність і пластичність). Вони сильно змінюються за умов нагрівання, введення ПАР, зміни кислотності та інших впливів;

2 – конденсаційно-кристалізаційні структури, що виникають під час зчеплення однотипних елементів на межі фаз. Такі структури мають відносно високу міцність, пружність і крихкість. Після руйнування вони не відновлюються.

3. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ РЕОЛОГІЇ І ТЕОРІЇ НАПРУЖЕНОГО ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАНУ

Реологія як наука про деформацію і плинність реальних тіл базується на феноменологічній поведінці тіл під час механічного навантаження. Вона досліджує співвідношення між діючим на тіло напруженням та деформацією, що викликане його дією.

З точки зору реології види тіл відрізняються тим, що за умов рівної напруги тіла мають різне деформаційне поведіння. Це обумовлено структурними властивостями окремого тіла, що може бути визначено через реологічні константи матеріалу.

Реометрія має за мету визначити усі найбільш істотні реологічні константи за допомогою штучного механічного впливу на досліджуване тіло.

Зважаючи на те, що не завжди за певної деформації тіла можна одночасно отримати всі його реологічні властивості, для повної кількісної оцінки реологічних властивостей тіла необхідно застосовувати різні методи

навантаження. Інструментальне визначення реологічних констант вимагає правильного вибору методів вимірів і приладів (реометрів).

Під дією зовнішнього навантаження в тілі виникають деформації і напруги, що є інтегральним відкликом сил внутрішньої взаємодії між елементами тіла. Розглянемо елементарний об'єм тіла у формі куба, грані якого знаходяться в напрямку осей x , y , z прямокутної системи координат (рис. 3.1).

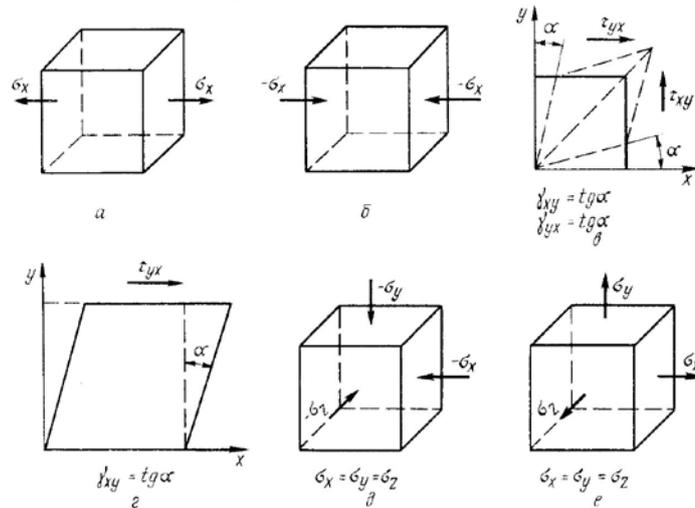


Рисунок 3.1 – Види навантажень та деформацій виділеного елементарного кубу продукту: а – одноосьове розтягнення; б – одноосьове стиснення; в – чистий зсув; г – простий зсув; д – ізотропне стискання (гідростатичний тиск); е – ізотропне розширення

На кожній грані куба присутня одна складова нормальної напруги σ_x і дві складових дотичної напруги $\tau_{x,y}$ і $\tau_{x,z}$ (перший індекс вказує на площину, другий – на напрямок складових). На рис. 3.1 показано основні види навантаження, які використовуються в реометрії для визначення основних характеристик структурно-механічних показників. Залежно від обраного виду механічного навантаження в пружних тілах діють різні напруження і деформації. Під час навантаження в'язких тіл для опису зміни деформації в часі використовують швидкість деформації $\dot{\gamma}$ (с^{-1}), яка складається з похідних за часом складників деформації, тому її називають градієнт швидкості зсуву (деформації).

3.1 Властивості рідиноподібних систем

Всі дисперсні (колоїдні) і високомолекулярні системи поділяються (за Ребіндером) на дві основні групи: рідиноподібні і твердоподібні. До рідиноподібних систем відносяться істиннов'язкі (ньютонівські) і структуровані рідини. На рисунку 3.2. (а, б) зображено характерні реологічні криві: криві плинущі $\dot{\gamma} = f(\tau)$ і залежність в'язкості від напруження зсуву $\eta =$

$f(\tau)$. Істиннов'язкі рідини характеризуються сталим періодом релаксації $\theta = \eta/G_0$, який не залежить від напруження зсуву, наявністю пропорційності градієнта швидкості на всьому діапазоні напружень в умовах практично ламінарного потоку з достатньо малим значенням критерію Рейнольдса, і, відповідно, постійною величиною в'язкості. Тобто, в'язкість ньютонівських рідин не залежить від швидкості зсуву і є константою рідини, яка визначається за формулою:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \quad (3.1)$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с; τ – напруження зсуву, Па; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹.

Для неньютонівських (структурованих) рідин в'язкість – функція швидкості зсуву (напруження зсуву), тому її називають ефективною в'язкістю. Залежність ефективною в'язкості від швидкості зсуву характеризується двома областями напружень з постійним значенням в'язкості – найбільшою граничною в'язкістю η_0 практично незруйнованої структури і найменшою в'язкістю η_m гранично зруйнованої структури. У рідиноподібних системах кожному значенню швидкості зсуву $\dot{\gamma}$ у стаціонарному потоці відповідає певна ступінь рівноважного руйнування структури. Залежність ефективною в'язкості від напруження або швидкості зсуву вважають основною характеристикою структурно-механічних властивостей дисперсних систем, так як ефективна в'язкість є узагальнюючою характеристикою, що описує рівноважний стан між процесами відновлення та руйнування структури у встановленому потоці. На відміну від твердоподібних, у рідиноподібних системах величина деформації нічим не обмежена. Характерними для рідиноподібних (неньютонівських) систем є наявність критичних напружень зсуву, які визначають умовні границі характерних станів системи: межу плинності τ'_r для області практично незруйнованої структури і межу практично зруйнованої структури τ'_m . Тобто, величина напруження τ_0 відповідає напруженню, яке імітує початок лавинного руйнування структури. Межу плинності також називають динамічним граничним напруженням зсуву, величину якого можна визначити методом екстраполяції прямолінійної ділянки графіку $\tau = f(\dot{\gamma})$ до $\dot{\gamma} = 0$.

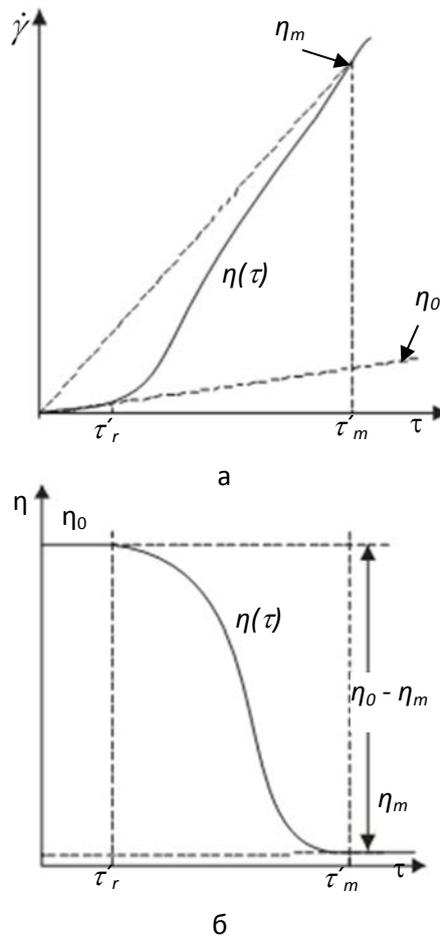


Рисунок 3.2 – Характерні повні реологічні криві структурованих рідин (рідиноподібних систем): а – криві повзучості; б – залежність в'язкості від напруження зсуву де τ_r' – умовна межа практично незруйнованої структури (межа умовно-постійної в'язкості), Па; τ_m' – умовна межа практично гранично зруйнованої структури, Па; η_0 – найбільша гранична ньютонівська в'язкість тобто умовно-постійна в'язкість практично незруйнованої структури, Па·с; η_m – найменша стала в'язкість практично гранично зруйнованої структури, Па·с

У тих випадках, коли область найбільшої в'язкості гранично незруйнованої структури не досяжна, важливим є метод її знаходження екстраполяцією залежності $\eta = f(\tau)$, до значення $\tau \rightarrow 0$. Для цього вибирається саме залежність $\eta = f(\tau)$, а не $\eta = f(\dot{\gamma})$. З метою екстраполяції найбільш зручною є логарифмічна форма ($\ln \eta = f(\tau)$), екстраполяція до $\tau \rightarrow 0$ дозволяє знайти η_0 [1].

З рисунку 3.2 (а) видно, що в рідиноподібних структурованих системах зі збільшенням напруги від найменших значень не спостерігається стрибкоподібної зміни в'язкості, тобто її значної зміни, зосередженим в досить вузькому інтервалі напруження. Це означає, що похідна ефективної

в'язкості за напругою $\left| \frac{d\eta}{d\tau} \right|$, як функція від τ не дає різко вираженого максимуму – піку, і ефективна в'язкість з зростанням напруги плавно зменшується в діапазоні від η_0 до η_m , що відповідає критичному напруженню τ'_m , вище якого в'язкість $\eta = \eta_m$ залишається сталою величиною.

У цих системах з метою практичних розрахунків можуть бути введені ще дві практично корисних величини: умовна динамічна границя плинності τ_{k2} і найменша пластична в'язкість η_m^* – по Бінгаму. Запровадження цих величин доцільно у випадках, коли на кривій плинності є досить широка, практично лінійна ділянка, що відповідає найбільш крутому нахилу до осі τ .

Якщо пластична в'язкість, що визначена для цієї ділянки $\eta_m^* = \frac{\tau - \tau_{k2}}{\dot{\gamma}} = ctg\alpha$ (α кут, що утворює пряма з віссю абсцис і відсікає відрізок $\tau = \tau_{k2}$) і є в цих межах сталою величиною, яка при цьому є значно меншою, ніж η_0 , то криву плинності можна апроксимувати прямою Бінгама. Така апроксимація базується на припущенні, що за $\tau < \tau_{k2}$ плин відсутній, а за $\tau > \tau_{k2}$ плин відбувається зі сталою в'язкістю [11].

Вказана ділянка відповідає зоні перегину кривої плинності, хоча ця зона може бути незнайденою через недосягнення постійної в'язкості η_m (що відповідає загибу кривої) внаслідок наступаючого розриву суцільності за достатньо високої в'язкості або турбулентності.

Інструментальне визначення ефективної в'язкості передбачає вимірювання парних значень $(\tau, \dot{\gamma})$ у широких межах $\dot{\gamma}$ для зображення кривої плинності і функції в'язкості.

Для характеристики рідин використовують криві плинності – реограми, що являють собою залежність напруги зсуву від швидкості деформації зсуву в умовах простого зсуву.

Реограма ньютонівських рідин являє собою криву 1 (рис. 3.3), що проходить через початок координат. Усі криві плинності (2...5), що відхиляються від прямої лінії, відповідають неньютонівським рідинам. При цьому крива 2 показує дилатантний плин, характерний, здебільшого, для концентрованих дисперсних систем, за якого збільшення швидкості деформації призводить до «ускладнення зсуву» (за високої концентрації дисперсної фази внаслідок утворення просторової структури виникає межа плинності); крива 3 показує псевдопластичний плин, що характерний для «зсувного розм'якшення» унаслідок руйнування структури зі збільшенням швидкості деформації; крива 4 показує нелінійний пластичний плин, характерний для більшості пластичних тіл, лінійна ділянка кривої 5 характерна для бінгамівських тіл і відповідає ідеально пластичному плинності.

Математичний опис поведінки рідини є передумовою для інженерного розрахунку процесу плинності. Для ньютонівських рідин застосовуються моделі,

що досить точно описують їхню поведінку в дослідній області напруги (табл. 3.1).

Моделі неньютонівських рідин містять, принаймні, дві реологічні характеристики матеріалу. Якщо неньютонівські рідини досліджують у широкому діапазоні швидкостей зсуву, починаючи з $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, то одержують повні криві плинності (рис. 3.2 (а); 3.5 (а)).

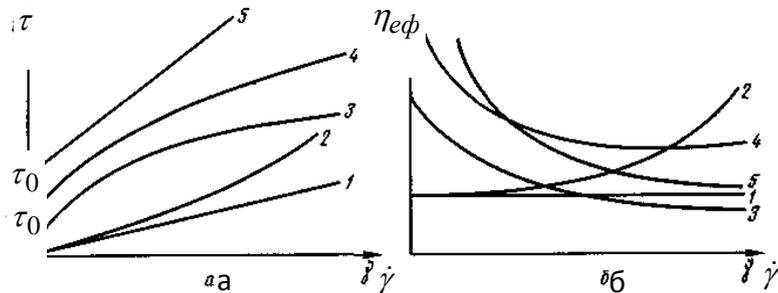


Рисунок 3.3 – Неповні криві плинності (а) і функції в'язкості (б): 1 – ньютонівської рідини; 2 – дилатантної рідини; 3 – структурно-в'язкої рідини, 4 – нелінійного пластичного тіла, 5 – лінійного пластичного тіла

Таблиця 3.1 – Реологічні моделі неповних кривих плинності

Автор моделі	Рівняння стану	Швидкість зсуву	Функція в'язкості
Ньютон	$\tau = \eta \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta}$	$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$
Освальд	$\tau = K \dot{\gamma}^n$	$\dot{\gamma} = \left(\frac{\tau}{K}\right)^{1/n}$	$\eta_{ef} = K \dot{\gamma}^{n-1}$
Бінгам	$\tau = \tau_0 + \eta_m^* \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_0}{\eta_m^*}$	$\eta_{ef} = \eta_m^* + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}$
Гершель-Балклі	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau - \tau_0)^{1/n}}{\eta_m^*}$	$\eta_{ef} = K \dot{\gamma}^{n-1}$

Примітка: Позначення величин, що входять у формули: τ – напруження зсуву, Па; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, s^{-1} ; η – ньютонівська в'язкість, Па·с; η_{ef} – ефективна в'язкість, Па·с; K – коефіцієнт консистенції, Па·сⁿ; η_m^* – найменша пластична в'язкість (бінгамівська), Па·с; n – індекс плинності; τ_0 (τ_{k2}) рис. 3.5 – умовна динамічна (бінгамівська) гранична напруга зсуву, Па.

Найбільш широке розповсюдження отримала узагальнена модель, яка описується рівнянням Гершеля-Балклі, за яким можна описати дев'ять кривих плинності (табл.3.2).

Таблиця 3.2 – Характеристика постійних рівняння Гершеля-Балклі

Граничне напруження зсуву	Індекс плинучості	В'язкість	Назва тіла
1	2	3	4
0	∞	∞	Пружне
>0	0	>0	Пластичне
>0	1	>0	Пластично-в'язке
0	<1	>0	Псевдопластичне
0	>1	>0	Дилатантне
>0	<1	>0	Нелінійно-пластичне
>0	>1	>0	Нелінійно-дилатантне
0	1	>0	Істиннов'язке
0	0	0	Ідеальна рідина

У деяких неньютонівських рідинах ефективна в'язкість залежить від тривалості зсуву t :

$$\frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \eta(\dot{\gamma}, t) = \eta_{ef}(t). \quad (3.2)$$

При цьому, мова йде про дисперсну систему зі структурою, що змінюється під час напруження зсуву і досягає динамічної рівноваги з деяким запізненням. Структурно-кінетична поведінка виявляється особливо чітко під час стрибкоподібної зміни швидкості зсуву. Якщо під час збільшення швидкості зсуву настає уповільнене з часом зменшення ефективної в'язкості, то мова йде про явище тиксотропії. Дисперсна система такого виду називається тиксотропною рідиною.

Якщо під час підвищення швидкості зсуву настає уповільнене з часом підвищення ефективної в'язкості, то мова йде про реопексивну поведінку рідини. Дисперсна система такого виду називається реопексивною рідиною.

Тиксотропію і реопексію вважають зворотним тільки в тому випадку, коли після припинення напруження зсуву поступово встановлюється початкове значення ефективної в'язкості. Якщо ж, навпаки, початкове значення ефективної в'язкості не досягається після припинення напруження зсуву, то мова йде про незворотну тиксотропію і реопексію.

Коефіцієнт тиксотропії (%) розраховується за формулою:

$$\lambda_m = \frac{\eta_z}{\eta_n} \times 100, \quad (3.3)$$

де λ_m – коефіцієнт тиксотропії, %; η_z – значення в'язкості зворотного ходу, Па·с; η_n – значення в'язкості прямого ходу, Па·с.

Для визначення коефіцієнту тиксотропії у формулу підставляють значення в'язкості з мінімальною, однаковою швидкістю зсуву.

За наявності тиксотропної поведінки криві прямого та зворотного ходу реограми не збігаються (рис. 3.4), тобто спостерігається гістерезис, що особливо чітко спостерігається за різкою зміною швидкості зсуву.

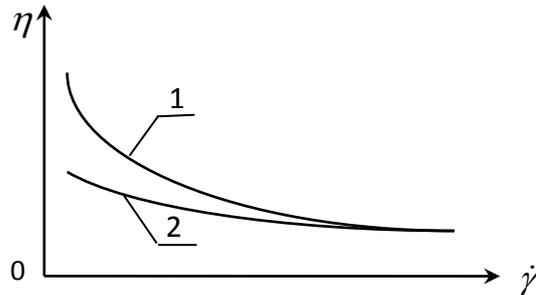


Рисунок 3.4 – Залежність в'язкості прямого та зворотного ходу у тиксотропних тіл: 1 – прямий хід; 2 – зворотний хід

Динамічна та ефективна в'язкість залежить від температури та найчастіше описується рівнянням Френкеля-Андраде:

$$\eta = A \cdot \exp\left(\frac{E}{R \cdot T}\right), \quad (3.4)$$

де A – коефіцієнт, пропорційний в'язкості, який порівняно мало залежить від температури, Па·с; E – енергія активації, яку повинна придбати молекула, щоб перейти на нове положення рівноваги, кДж/моль; R – універсальна газова постійна (8,31 кДж/моль·К); T – абсолютна температура, К.

Логарифмуючи рівняння 3.4 та знаючи температурну залежність в'язкості, можна знайти значення енергії активації, бо залежність між $\ln \eta$ та $\frac{1}{T}$ описується прямою лінією. Проте слід пам'ятати, що графік $\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$ для реальних рідин являє собою пряму тільки у відносно вузькому діапазоні температур; у більш широкому температурному інтервалі, як правило, спостерігається скривлення залежності. Для дослідження властивостей рідиноподібних систем широко використовують ротаційні віскозиметри [1;9;13;18;20;23].

3.2 Властивості твердоподібних систем

До твердоподібних систем відносяться як пружно-крихкі або еластично-крихкі, так і пружно-пластичні тіла. Пружно-пластичні (істинно-пластичні) тіла (рис. 3.5) характеризуються наявністю істинної границі плинності τ_k , що співпадає з границею пружності, тобто такою граничною напругою зсуву, нижче якої експериментально ніякої течії не спостерігається за найбільшій можливої тривалості вимірювання і їх точності, існуючими методами. Це означає, що в'язкість і період релаксації в області $\tau < \tau_k$ (область пружності) практично нескінченно великі (не можуть бути вимірними). Проте, виходячи із класичних уявлень Максвелла й сучасної теорії теплового руху у твердих тілах (кристалах), потрібно допускати принципову наявність у них релаксації за умов дуже малих напругах зсуву. Під час накладення напружень дещо більших за істинну границю плинності, спостерігається повільна деформація типу повзучості. У цій області структура руйнується під час деформації в дуже малому ступені, так що плин відбувається практично в незруйнованій структурі. Проте цей плин обмежується граничною деформацією, характерною для твердих тіл, під час досягнення якої відбувається лавинне руйнування жорсткого каркасу й, залежно від типу структури, у системі виникає або розрив суцільності (чисто конденсаційно-кристалізаційної структури) або плин, вже не обмежений граничною деформацією (змішані кристалізаційно-коагуляційні структури, див. далі). У істиннопружній області, обмеженої межею пружності (плинності), напруги $\tau < \tau_k$ викликають тільки пружні й еластичні деформації, повністю зворотні за величиною, тобто які зникають після розвантаження. Дещо вище за межу пружності (у кристалізаційних структурах) є область повільного плину типу повзучості в практично незруйнованій структурі. Для цієї області за наявності прямолінійної ділянки кривої плину для практичних розрахунків може бути уведена величина найбільшій пластичної в'язкості. Цей метод використовується для визначення пластичної в'язкості під час дослідження харчових продуктів за допомогою еластопластометру Толстого (за умов простого зсуву) та ваг Каргіна-Соголової (за умов одноосьового стиснення).

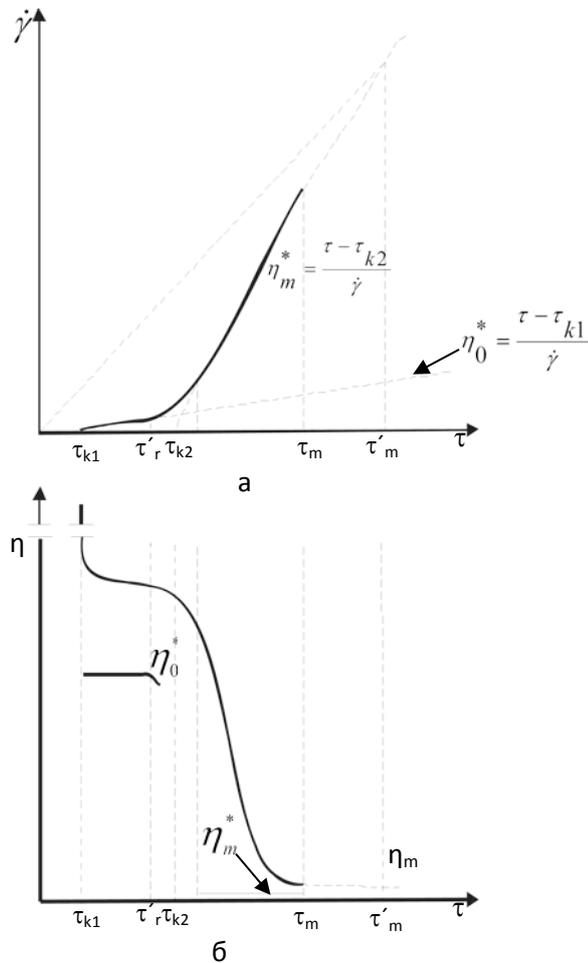


Рисунок 3.5 – Характерні реологічні криві для твердоподібних систем (істинно або умовно-пластичних): а - криві повзучості; б – залежність в'язкості від напруження зсуву, де τ_{k1} – умовна статична границя плинності, Па; τ'_r – умовна границя практично незруйнованої структури (межа умовно-сталого в'язкості), Па; τ_{k2} – умовна динамічна (бінгамівська) гранична напруга зсуву, Па; τ_m – міцність структури за пружно-крихкого або еластичного розриву, Па; τ'_m – умовна межа практично гранично зруйнованої структури, Па; η_0^* – найбільша пластична в'язкість (шведівська), Па·с; η_m^* – найменша пластична в'язкість (бінгамівська), Па·с; η_m – найменша стала в'язкість гранично зруйнованої структури, Па·с; τ_k – істинна границя плинності, що співпадає з істинною границею пружності (ГНЗ) $\tau_k < \tau_{k1}$ (на рисунку вона не зображена).

На рис. 3.5 (а) подано повну реологічну криву і для умовно-пластичного тіла (коагуляційної структури), що відрізняється від істиннопластичного відсутністю істиннопружної області та істинної границі плинності τ_k .

Такі тіла характеризуються умовно-пружною областю, обмеженою умовною границею текучості τ_{k1} . У цій області напруг під час тривалого спостереження можна встановити необоротні деформації, що свідчать про наявність повзучості з в'язкістю, хоча й дуже високою, але вимірювальною

на практиці. За напруги $\tau < \tau_k$ подібне тіло дуже повільно тече, причому початкова ділянка, а іноді і вся умовно-пружна область реологічної кривої описується прямою, що свідчить про наявність на цій ділянці найбільшої сталої в'язкості η_0 . Ця ділянка характеризується також константами $E_{пр}$, $E_{ел}$, $G_{пр}$ та $G_{ел}$, $\eta_{пр}$.

Під час переходу напруг через умовну границю текучості, тобто за $\tau > \tau_{к1}$, в умовно-пластичному тілі в деякому інтервалі напруг лавинно розвиваються процеси руйнування, у зв'язку із чим в'язкість стрибкоподібно падає на кілька порядків (рис. 3.5 (б)).

Різкість падіння ефективної в'язкості, тобто різкість і висота максимуму похідної $\frac{d\eta}{d\tau}$, що характеризує виникнення чіткої границі плинності $\tau_{к1}$, збільшується зі зростанням різниці $\eta_0 - \eta_m$, тому що з досить загального рівняння реологічної кривої або кривої $\eta(\tau)$ величина $-\frac{d\eta}{d\tau}$ пропорційна $(\eta_0 - \eta_m)$. Ця форма залежності підсумкового періоду релаксації від напруги, й наявність дуже високої в'язкості незруйнованої структури (великого періоду релаксації) визначає дану систему як твердоподібну.

Вище умовної границі плинності $\tau_{к1}$ на реологічній кривій $\dot{\gamma}(\tau)$ можна спостерігати лінійну ділянку, довжина якої буває різною. Ця ділянка обмежена критичним напруженням τ'_r . Для практичних розрахунків можна визначити величину пластичної (шведівської) в'язкості η_0^* , зворотне значення якої – рухливість $\frac{1}{\eta_0^*}$, виражає інтенсивність руйнування структури в цій області, бо ефективна в'язкість на цій ділянці поступово зменшується.

За напруги, що перевищують граничну напругу практично незруйнованої структури τ'_r , зі збільшенням напруги відбувається наростаюче руйнування структури, яке закінчується або розривом суцільності, що характеризується межею міцності τ_m , або коли в'язкість системи зі зруйнованою структурою досить велика, досягається напруга граничного руйнування структури τ'_m , вище якого гранично зруйнована структура тече з найменшою сталою в'язкістю η_m . Умовно-пластичні системи займають проміжне місце між рідиноподібними системами й твердими тілами. Їхнє руйнування за малих градієнтів швидкості відбувається поступово зі зростанням градієнта, як у рідиноподібних систем. За досить високих градієнтів стаціонарний потік не спостерігається, й руйнування з розривом суцільності відбувається під час досягнення граничної деформації [11].

Для дослідження незруйнованих структур необхідно користуватися методикою $\dot{\gamma}(t)$ за $\tau = const$, а для одержання повної реологічної кривої –

методикою $\tau(\gamma)$ за $\frac{d\gamma}{dt} = const$ [6;11;15;16].

Характерна крива залежності відносної деформації від тривалості дії сталого напруження наведена на рис. 3.6. На ній виділяють наступні ділянки:

γ_0, ε_0 (ділянка OA) – пружна умовно-миттєва деформація, що миттєво (за дуже короткий проміжок часу) виникає під дією прикладеної напруги та миттєво зникає після її зняття;

γ_M, ε_M (ділянка OC) – максимально досягнута деформація під дією прикладеної напруги;

$\gamma_{зв}, \varepsilon_{зв}$ (ділянка OB₁) – високоеластична деформація – повністю оборотна відносна деформація: $\gamma_{зв} = \gamma_0 + \gamma_{ве}$ ($\varepsilon_{зв} = \varepsilon_0 + \varepsilon_{ве}$);

$\varepsilon_{ве}$ (ділянка AB₁) – високо еластична деформація – відносна деформація, що поступово зникає після зняття напруги: $\gamma_{ве} = \gamma_{зв} - \gamma_0$ ($\varepsilon_{ве} = \varepsilon_{зв} - \varepsilon_0$);

$\gamma_{зал}, \varepsilon_{зал}$ (ділянка EO₁) – залишкова (пластична) деформація, яка не зникає після зняття прикладеної напруги протягом нескінченно тривалого часу: $\gamma_{зал} = \gamma_{пл}$ ($\varepsilon_{зал} = \varepsilon_{пл}$).

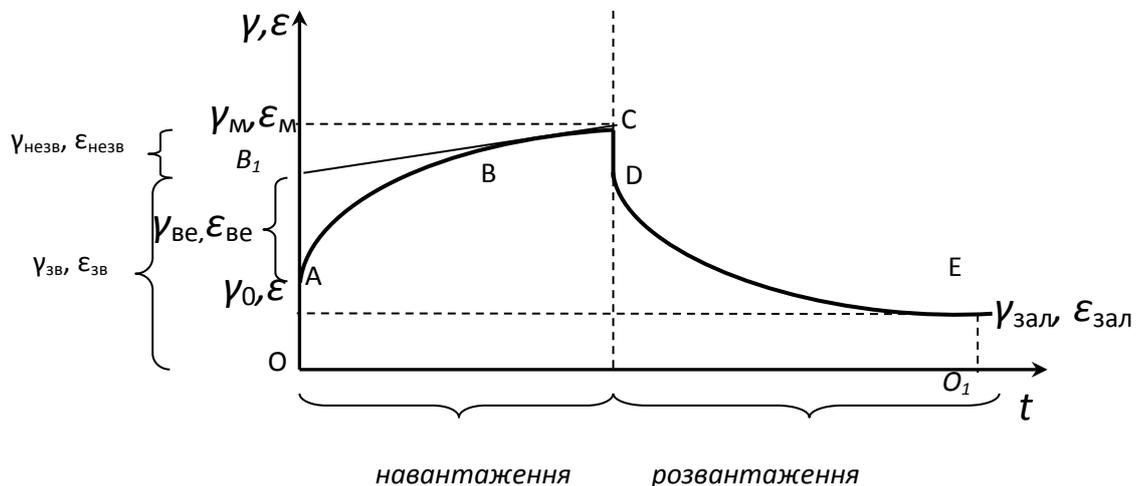


Рисунок 3.6 – Крива повзучості дослідного зразку під дією прикладеної напруги (за навантаження та розвантаження)

Відокремлення загальної деформації на зворотну і незворотну здійснюється спрощеним методом екстраполяції лінійної ділянки деформації до перетину з віссю ординат (запропонованим Ребіндером). Припускається, що швидкість наростання незворотної деформації стала і не залежить від величини еластичної деформації. Якщо екстраполювати лінійну ділянку до нуля і перенести її в початок координат, то отримують швидкість наростання незворотної деформації [15].

Як правило, під час досліджень реальних систем криві деформації за умов навантаження та розвантаження не співпадають, а утворюють петлю гістерезису (для цього криву деформації розвантаження переносять в початок координат, при чому вона буде нижче кривої навантаження). Пояснень цього явища може бути декілька – перехід механічної енергії в теплову, руйнування

структури під дією прикладеного навантаження та нездатність її до відновлення після зняття навантаження [17].

4. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СИРОВИНИ ТА ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

Віскозиметри використовуються для контролю якості вихідної сировини, напівфабрикатів і готового продукту, а також для контролю технологічного процесу. Необхідна умова під час проведення досліджень – підтримання в робочому зазорі ламінарного руху продукту, а також температури.

Підготовка до роботи і порядок роботи

1. Перед початком роботи слід перевірити санітарний стан вузлів приладів, які планується використати у вимірюваннях.
2. Підключити прилад до електромережі.
3. Перевірити працездатність на холостому ході.
4. Для вагів Каргіна-Соголової встановити мікроскоп та врівноважити ваги;
5. Для еластопластометру Толстого встановити мікроскоп та вивірити прилад на горизонтальність.
6. Провести вимірювання впливу параметру, що досліджується, при цьому слідкувати за сталістю інших параметрів.

4.1 Ротаційний віскозиметр сталої напруги зсуву ВПН – 0,2М

Будова та принцип дії. Електричну структурну схему віскозиметра ВПН – 0,2М наведено на рис. 4.1.

Вимірювальні вузли слід використовувати залежно від величини очікуваної в'язкості об'єкту, що досліджується, й інтервалу напруги зсуву згідно з табл. 4.1.

Межа допустимої похибки вимірювання в'язкості складає $\pm 6\%$ від величини, що вимірюється. Робоча температура в термостаті встановлюється від $+2$ до $+150^{\circ}\text{C}$. Абсолютна похибка встановлення температури в зазорі $+1,5\text{ C}$ від встановленого значення. Час виходу на стаціонарний температурний режим складає 40 хв.

Під час зміни напруги зсуву необхідно слідкувати за тим, щоб період обертання ротору вимірювального вузла був не менше 1с, що відповідає межі роботи приладу по межі допустимої похибки вимірювання швидкості зсуву.

Безпосередньо для проведення дослідження необхідно завантажити дослідний об'єкт у вимірювальний вузол. Кількість речовини, що необхідна для вимірювання, вказана в табл. 4.1 в графі «Об'єм зазору». Поступово збільшуючи напругу ручкою «Встановлення напруги», підібрати період обертання (який знімають з табло частотоміру в мілісекундах, а у формулу підставляють значення в секундах) з необхідним кроком, враховуючи коефіцієнт форми вузла, так, щоб значення в'язкості для зразків, що порівнюються, були розраховані за однакових значень швидкості зсуву. Для

фіксованого значення напруги зняти до п'яти значень періоду обертання, виключаючи грубі помилки, знайти середнє значення. Для отриманих значень періоду обертання занотувати значення напруги у вольтах. Повторюючи вищевказані дії, зняти необхідну кількість показань.

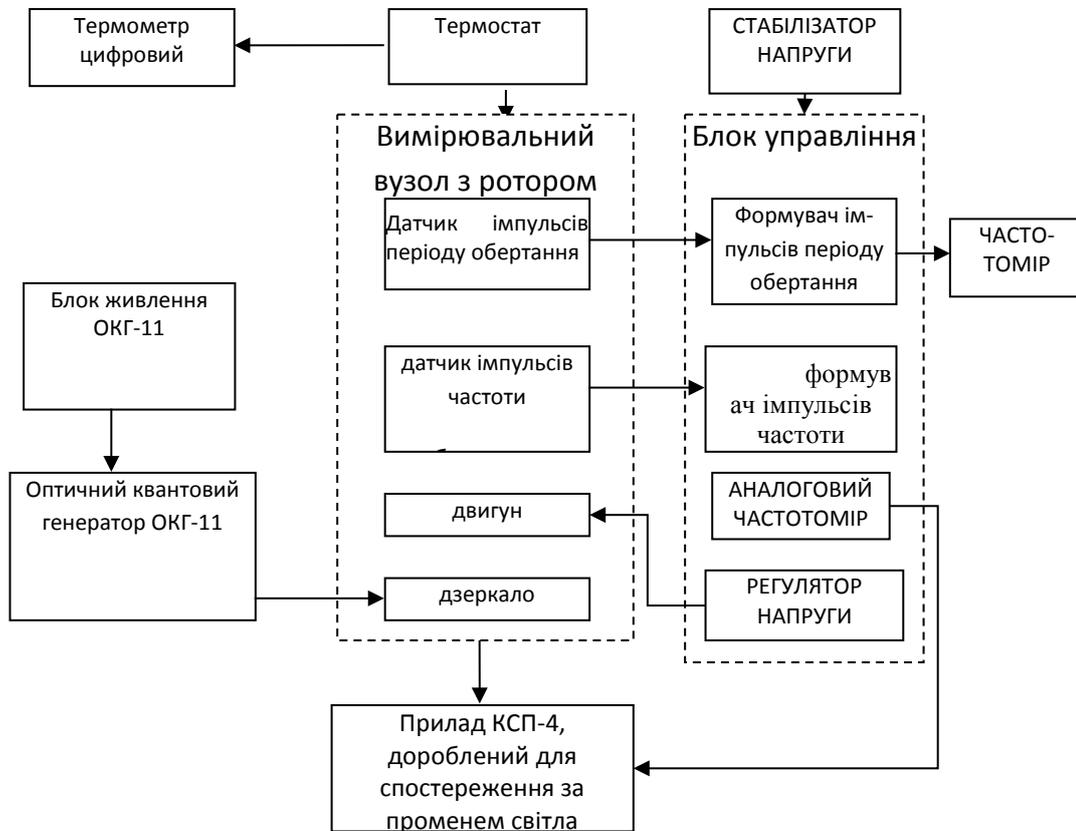


Рисунок 4.1 – Електрична структурна схема віскозиметру ВРН-0,2М

Таблиця 4.1 – Характеристика параметрів вимірювальних вузлів

Параметр	Розмір вимірювального вузлу, мм		
	100	40	20
В'язкість, Па·с	$10^{-1} \dots 10^4$	$5 \dots 10^5$	$20 \dots 10^7$
Напруга зсуву, Па	3...80	30...800	500...4000
Швидкість зсуву, с^{-1}	$10^{-3} \dots 160$	$10^{-3} \dots 50$	$10^{-3} \dots 30$
Константа вузла К, Па/В	0,4902	4,42	13,6
Коефіцієнт форми А	$3,19 \times 10^{-3}$	$7,47 \times 10^{-3}$	$1,37 \times 10^{-2}$
Об'єм зазору, см^3	50	35	15
Величина зазору, м	—	$2,01 \times 10^{-3}$	$1,98 \times 10^{-3}$

Примітка: Значення деяких параметрів в'язкості, напруги, швидкості зсуву орієнтовні. Швидкість зсуву $10^{-3} \dots 10^{-1} \text{с}^{-1}$ вимірюється частотоміром. Вимірювання швидкості зсуву від 10^{-5} до 10^{-3} здійснюється оптичним способом за допомогою ОКГ-11 і спостережного потенціометру КСП-4.

Динамічну або ефективну в'язкість визначають за формулою:

$$\eta = k \cdot U \cdot T \cdot A, \quad (4.1)$$

де η – ефективна або динамічна в'язкість, Па·с; k – константа вимірювального вузла, Па/В; U – напруга, В; T – період обертання, с; A – коефіцієнт форми вимірювального вузла.

Швидкість зсуву визначають за формулою:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{T \cdot A}. \quad (4.2)$$

Напруження зсуву визначають за формулою:

$$\tau = k \cdot U. \quad (4.3)$$

Для порівняння в'язкості двох та більше об'єктів порівнюють в'язкість з однаковою швидкістю зсуву, яку, як правило, обирають в області максимальної в'язкості гранично незруйнованої структури або мінімальної в'язкості зруйнованої структури.

4.2 Ротаційний віскозиметр типу RN

Будова та принцип дії. Ротаційний віскозиметр типу RN зображено на рис. 4.2.

Ротаційний віскозиметр типу RN випускався фірмою «Прюфгеретевеке» (колишня ГДР). Віскозиметр складається з вимірювального приладу 10, вимірювальної голівки з обертовим ротором 3 і термостатуючої камери 17. Віскозиметр кріпиться на штативі 11 за допомогою кронштейна 12 і затискного гвинта 13. Рукоятка 15 потрібна для встановлення необхідної частоти обертання ротора. Швидкість необхідно змінювати тільки за умови виключеного віскозиметра. Цифрам 1, 2, 4 і 10, що є на рукоятці перемикача 15, відповідають наступні частоти обертання ротора (с⁻¹): 2,7; 1,3; 0,7; і 0,3.

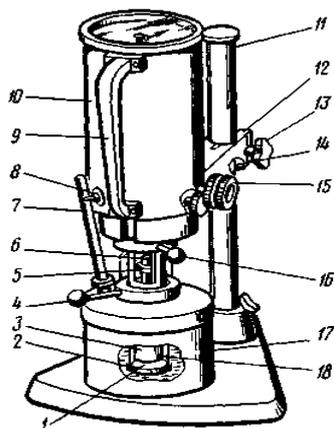


Рисунок 4.2 –
Ротаційний віскозиметр
типу RN

За допомогою муфти 6 ротор 3 з'єднується з валом вимірювального приладу, фіксація виконується гайкою 5. Зовнішній нерухомий циліндр 18, розташований співосно з ротором 3, кріпиться затискним важелем 16. Дно мірних циліндрів виконано у вигляді кришки 1 із прокладкою і запірною гайкою 2. Байонетним запором термостатуюча камера з'єднується з циліндром 18. Він фіксується затискним важелем 4. Температура контролюється за показника термометру 7. Положення приладу по висоті щодо штатива 11 можна регулювати; нижнє положення обмежується

упором 14 таким чином, що в стані, готовому до виміру, прилад не спирається на плиту штатива.

Віскозиметр приєднується до мережі напругою 220 В частотою 50 Гц за допомогою кабелю; вимикач 8 розташований біля рукоятки 9.

Для розширення діапазону виміру в'язкості для віскозиметра RN фірма поставляє три вимірювальні системи, що складаються з циліндрів різного радіусу і довжини. Технічні характеристики приладу наведено в табл. 4.2. Характеристики вимірювальних вузлів наведено в табл. 4.3, принципову схему вимірювального вузла зображено на рис. 4.3 (а).

Описаний віскозиметр також можна застосовуватись за умов вільного занурення ротора безпосередньо в посудину з вимірюваним матеріалом. Похибка не більше $\pm 5\%$. Вузол N використовується для дослідження низьков'язких систем, вузол M – для середньов'язких, вузол H – для високов'язких.

Віскозиметр RN рекомендується для вивчення як ньютонівських, так і неньютонівських матеріалів, у тому числі мінеральних масел, пластмасових розчинів і дисперсій, віскози, шоколадних мас, фармацевтичних виробів і т. п.

На рис. 4.3 (б) зображено принципову схему віскозиметра безпосередньої оцінки, яка аналогічна схемі віскозиметра RN. Робочий ротор 3 через вал 5 з'єднаний із пружиною 6. На валу є диск зі шкалою 7, а на корпусі — показчик в'язкості 8. Синхронним електродвигуном 1 через редуктор 2 приводиться в обертання зовнішній циліндр 4 з досліджуванним матеріалом. Під час обертання циліндра 4 за рахунок в'язкості матеріалу на роторі 3 виникає момент опору. Тому що ротор 3 валом пов'язаний із пружиною 6, остання деформується й закручується на кут, пропорційний певному числу розподілів на шкалі відліку.

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики віскозиметру типу RN

Ротор	Циліндр	Циліндр		
		N, м	M, м	H, м
R		0,0150	0,011	0,00750
r ₁		0,0145	0,010	0,00575
r ₂		0,0135	0,006	0,00425
h		0,0600	0,033	0,02250

Один циліндр забезпечує одержання в'язкості за восьми значень швидкості зсуву (під час використання вала з радіусом r₁ та r₂). Під час зміни вала необхідно використовувати новий зразок, повторно використовувати зразок, що піддавався навантаженню не рекомендується. Для одержання залежності в'язкості від швидкості зсуву прямого ходу слід змінювати частоту обертання в такому напрямку №10, потім №4, №2 та №1.

Таблиця 4.3 – Характеристики вимірювальних вузлів віскозиметра типу RN

Циліндр	Ротор	Об'єм зазору, см ³	Константа циліндра, z	Гradient швидкості зсуву для позицій 1, 2, 4, 10 ($\dot{\gamma}$), с ⁻¹			
				№1	№2	№4	№10
N	N1	13	0,27933	241,82	116,43	62,69	26,87
	N2	18	0,23693	72,32	34,82	18,75	8,04
M	M1	6	0,88625	80,78	38,90	20,94	8,98
	M2	9	0,7800	7,19	3,46	1,86	0,80
H	H1	4	2,55923	24,19	11,65	6,27	2,69
	H2	5	2,18541	8,02	3,86	2,08	0,89

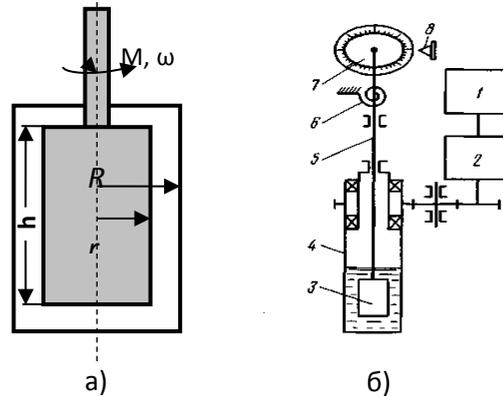


Рисунок 4.3 – Принципові схеми: а – вимірювального вузла; б – віскозиметра безпосередньої оцінки: 1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – ротор; 4 – циліндр; 5 – вал; 6 – пружина; 7 – шкала; 8 – покажчик

Динамічну або ефективну в'язкість визначають за формулою:

$$\eta = \frac{\alpha \cdot z}{\dot{\gamma}}, \quad (4.4)$$

де α – кут відхилення на шкалі віскозиметра, рад; z – константа циліндра, Па на од. шкали; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹.

Швидкість зсуву визначають за формулою:

$$\dot{\gamma} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N \cdot r^2}{R^2 - r^2}, \quad (4.5)$$

де N – частота обертання ротора, с⁻¹; r – радіус ротора, м; R – радіус циліндра, м.

Напруження зсуву визначають за формулою:

$$\tau = \alpha \cdot z. \quad (4.6)$$

4.3 Реовіскозиметр Геплера

Метод вимірювання в'язкості на реовіскозиметрі, заснований на вільному падінні кульки в трубі, широко використовується для ньютонівських рідин. Ефективну в'язкість дослідних систем можна визначати згідно з законом Стокса в діапазоні температур $-60...+120^{\circ}\text{C}$, підігриваючи або охолоджуючи зразки з інтервалом 5°C , за принципом падаючої в рідині витискувальної скляної кульки, виготовленої заводом ФЕБ Карл Цейсс Йена з допуском на точність розміру і форми менше $0,001\text{ мм}$. Швидкість падіння скляної кульки залежить від в'язкості. Для дослідження неньютонівських матеріалів рух кульки здійснюється примусово з різними швидкостями під впливом навантаження.

Будова та принцип дії. Реовіскозиметр Геплера (рис. 4.4) призначений для визначення в'язкості рідиноподібних продуктів. Під час транспортування приладу використовується ексцентрик 9 для закріплення коромисла. Вимірювальні циліндри закріплюють гвинтом 13. Стрижень з кулькою прикріплюється до коромисла за допомогою гвинта 3. Пересувна гиря 8 використовується для компенсації виштовхувальної сили дослідного зразку. Для цього у циліндр з дослідним зразком встановлюють стрижень з кулькою на середину вимірювальної ділянки, стрілка індикатора повинна показувати 15 мм . Після чого встановлюють гирю в положення, за якого стрілка залишиться на позначці 15 мм . За допомогою двох регулюючих гвинтів 11 встановлюють реовіскозиметр в горизонтальне положення за рівнем 10. Гвинти підтримують плиту, на якій встановлено термостат 12 і набір з п'яти вантажів 6 (цифри на вантажах означають силу, що діє на 1 см^2 дослідної рідини). Рух стрижня з кулькою 2 у вимірювальному циліндрі 4 здійснюється примусово за допомогою коромисла 1 під впливом навантаження 5. Дослідження пройденого кулькою шляху здійснюється за допомогою індикатора 7. За допомогою секундоміра фіксується час, за який кулька проходить весь шлях (30 мм). При цьому необхідно виконувати декілька замірів і визначати середнє арифметичне значення часу за даним напруженням.

Для визначення в'язкості використовується п'ять вимірювальних циліндрів, кожен з яких має своє калібруюче число, а також два стрижня з кулькою. Стрижень, що має насічку, використовується для циліндрів з калібруючими числами $0,01$ і $0,1$, інший, без насічки, для циліндрів з числами 1 , 10 , 100 . Інтервал вимірювання напруження зсуву $981...19620\text{ Па}$. Діапазон вимірювання в'язкості $0,04...4000\text{ Па}\cdot\text{с}$ з точністю $\pm 2\%$. Необхідна кількість продукту залежить від вимірювальної трубки і складає $16...25\text{ см}^3$. Так, за різних навантажень і швидкостей кульки одержують різні значення напруги зсуву. Для неньютонівських рідин необхідно обов'язково вказувати, за якого напруження зсуву або швидкості зсуву одержано значення в'язкості. Для таких рідин можна побудувати криву плинності, проте, для цієї мети бажано використовувати й інші прилади. За допомогою віскозиметра Геплера найчастіше проводять дослідження в'язкості залежно від температури.

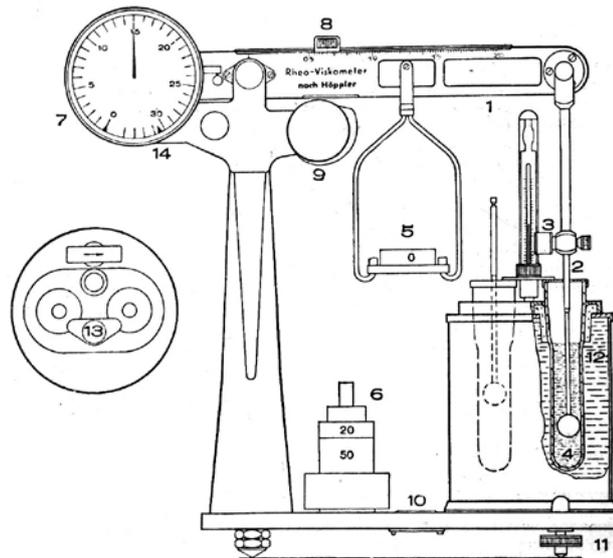


Рисунок 4.4 – Кульковий реовіскозиметр Геплера

Підготовка та проведення досліджень. Вивіряють прилад на горизонтальність за допомогою двох регулювальних гвинтів та рівня. Приєднують до термостату підігрівальний котел 5. Встановлюють в котлі і закріплюють один з 5-ти вимірювальних циліндрів (циліндр вибирають залежно від в'язкості дослідного зразка). Заповнюють вимірювальний циліндр дослідним зразком. Вкладають у вимірювальний циліндр одну зі скляних кульок на стержні. Закріплюють стержень на коромислі за допомогою гвинта. Виконують компенсацію підйимальної сили дослідного зразку за допомогою пересувної гирі на коромислі.

Вмикають термостат з теплоносієм (вода або соняшникова олія) і насос термостата. Після досягнення необхідної температури в котлі фіксують ексцентриком коромисло, навантажують його потрібною гирькою і звільняють коромисло, одночасно вмикаючи секундомір. Після проходження повного шляху кулькою (30 мм), фіксують секундоміром час. Виконують за даної температури 3...5 замірів та знаходять середнє значення. Підвищують температуру в потрібному інтервалі та продовжують дослідження після її стабілізації. Для стабілізації температури у вимірювальному циліндрі після її підвищення (зниження) необхідно примусово вручну кілька разів підняти і опустити в ньому кульку і витримати 15...30 хв, після чого можна виконувати вимірювання.

Ефективна в'язкість дослідних систем розраховується за формулою:

$$\eta = \sigma \cdot t \cdot K, \quad (4.7)$$

де σ – напруження, Па; t – час проходження кулькою вимірювального інтервалу (30 мм), с; K – константа вимірювального циліндра (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Характеристики вимірювальних циліндрів реовіскозиметра Геплера

Маркер циліндра	Константа циліндра	Діапазон вимірювань в'язкості, Па·с
0,01	0,00227	0,04...2,8
0,1	0,0872	0,2...4
1	1,1464	2...40
10	11,410	20...400
100	115,086	200...4000

4.4 Плоскопаралельний еластопластометр Толстого

Будова та принцип дії. Еластопластометр складається зі стола 1 (рис. 4.5), на якому розміщено підставку 4 для встановлення пластини зі зразком 7, мікроскоп 12 для дослідження зміщення голки 11, блок 9, через який діє навантаження на верхню пластину 6 за рахунок підвішеної гирі 10.

Приготування зразків. Для приготування структурованих зразків використовують форму 9 (рис. 4.6), яка являє собою паралелепіпед, в яку вертикально встановлюють дві робочі пластини: металеву та плексигласову; при цьому вони розміщуються у вкладці 10. Приготовлений таким чином зразок витримують для структурування, виймають його за допомогою вкладки 10 та встановлюють в прилад. Пастоподібні, пластичні системи розміщують між пластинами у вкладиші 10, виймають та залишають для тиксотропного відновлення структури на 15...20 хв.

Перед проведенням дослідження пластини 1 (металева) і 2 (плексигласова), між якими вставляється зразок, вставляють в спеціальну металеву коробку 3 з кришкою 4 і затвором 5. Пластини мають ребристу поверхню для запобігання прослизання зразків. Коробка має два отвори (6): через один виходить нитка 7 на блок, який передає навантаження, через інший виходить голка 8 для спостереження за розвитком деформації за зсувом верхньої пластини.

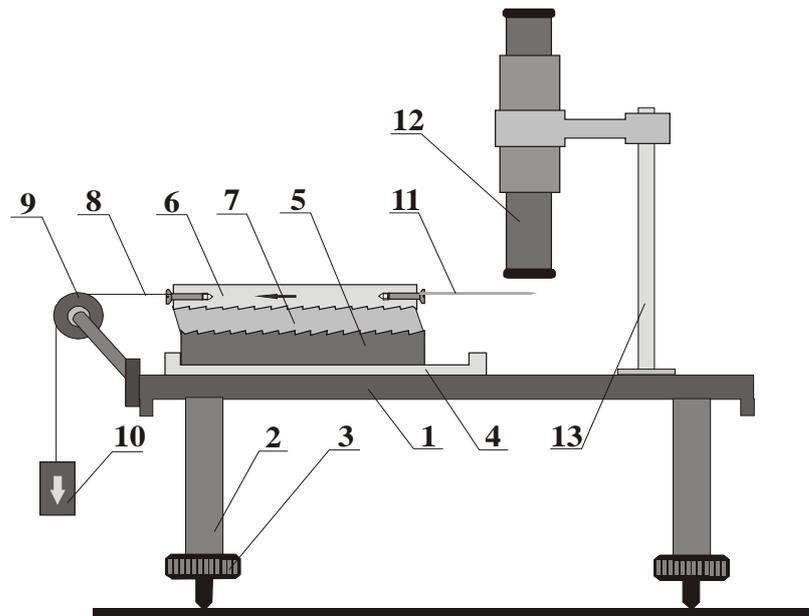


Рисунок 4.5 – Плоскопаралельний еластопластометр Толстого: 1 – стіл; 2 – опорна ніжка; 3 – регулювальний гвинт; 4 – металева підставка; 5 – металева пластина; 6 – пластина з плексиглазу; 7 – дослідний зразок; 8 – шовкова нитка; 9 – блок; 10 – вантаж; 11 – спостережна голка; 12 – мікроскоп; 13 – штатив

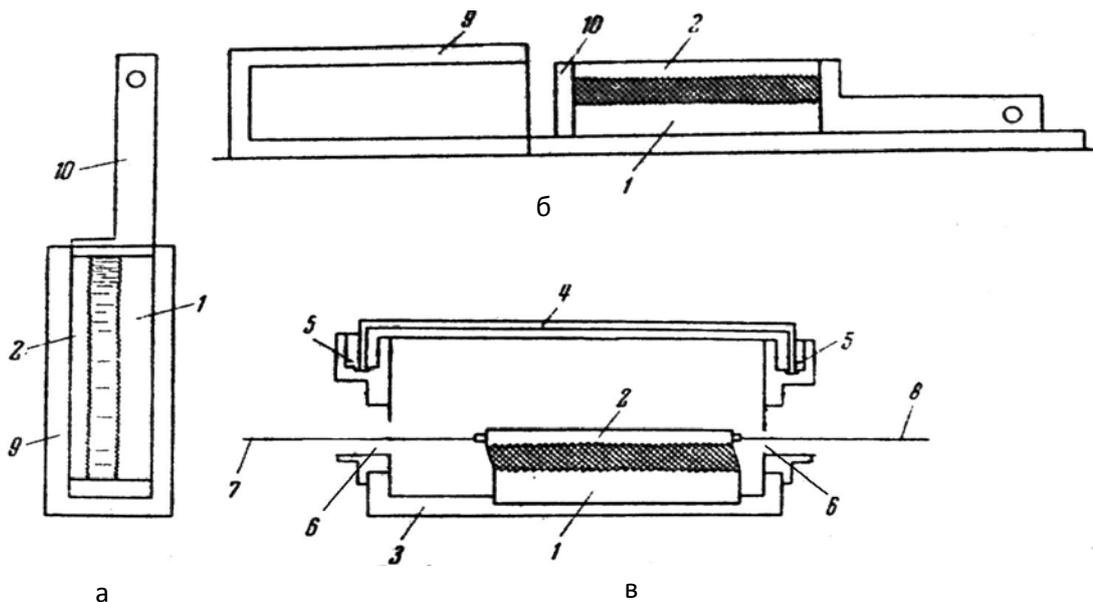


Рисунок 4.6 – Форма для одержання зразків (а, б) і коробка для захисту дослідного зразка від впливу навколишнього середовища (в)

Проведення досліджень. Метод вимірювання заснований на визначенні деформації зсуву, віднесеного до товщини зразка. Звичайною мірою процесу є не деформація, а піддатливість, тобто деформація, віднесена до постійно діючої напруги. Піддатливість в умовах лінійного поведіння є константою і не залежить від напруги.

Перше значення абсолютної деформації одержують за допомогою мікроскопа миттєво, як тільки навантаження починає діяти на верхню пластину. Після цього з періодичністю 1 хв. знімають значення абсолютної

деформації протягом 10 хв. Подальші спостереження можна вести з періодичністю 5 хв. Після зняття навантаження фіксують миттєву деформацію, а потім знімають показники приладу з такою частотою, як і під час навантаження. Дослідження припиняють якщо протягом 30 хвилин не вдалось зафіксувати зміну абсолютної деформації.

Під час дослідження структурно-механічних характеристик модельних систем, напівфабрикатів та готової продукції необхідно підібрати фіксоване навантаження для всіх систем, що вивчаються (тобто навантаження для всіх зразків повинно бути однаковим), для того, щоб порівняти їх значення. Крім цього важливо також забезпечити однакову температуру та висоту зразків. Для визначення структурно-механічних показників будують залежність відносної деформації від часу дії напруги $\gamma = f(t)$ (рис. 4.7).

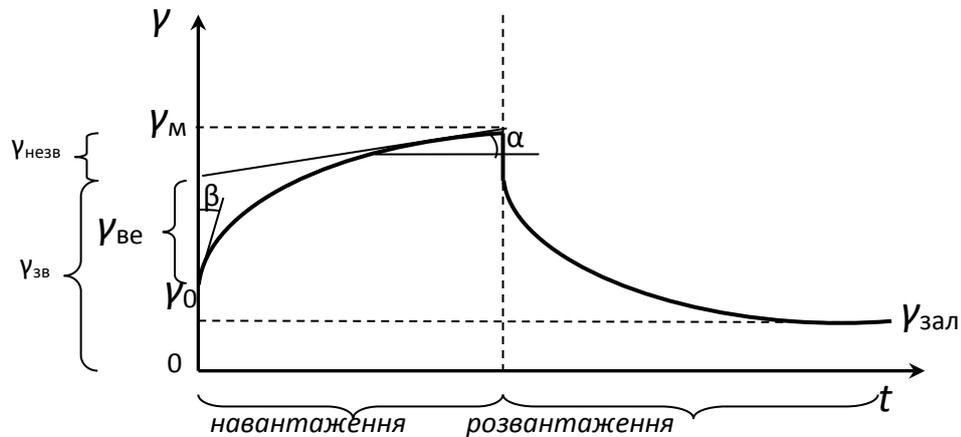


Рисунок 4.7 – Крива повзучості дослідного зразка під дією прикладеної напруги зсуву (за навантаження та розвантажування)

Відносну деформацію визначають за формулою:

$$\gamma = \frac{k \cdot n}{d}, \quad (4.8)$$

де k – ціна поділки мікроскопа, м; n – число поділок у шкалі мікроскопа; d – товщина зразка, м.

Розділення загальної деформації на зворотну і незворотну проводять шляхом екстраполяції лінійної ділянки графіку $\gamma = f(t)$ на вісь ординат.

Коефіцієнт відношення зворотної деформації до загальної визначають за формулою:

$$K_{\gamma} = \frac{\gamma_{зв}}{\gamma_{м}}, \quad (4.9)$$

де $\gamma_{зв}$ – величина зворотної деформації; $\gamma_{м}$ – величина максимальної деформації.

Напруження зсуву визначають за формулою:

$$\tau = \frac{m \cdot g}{S}, \quad (4.10)$$

де τ – напруження зсуву, Па; m – маса вантажу, кг; g – прискорення вільного падіння ($9,81 \text{ м/с}^2$); S – площа пластинки, м^2 .

Піддатливість системи визначають за формулою:

$$I = \frac{\gamma_m}{\tau}, \quad (4.11)$$

де I – піддатливість системи, Па^{-1} ; γ_m – відносна максимальна деформація.

Модуль миттєвої пружності визначають за формулою:

$$G_{np} = \frac{\tau}{\gamma_0}, \quad (4.12)$$

де G_{np} – модуль миттєвої пружності, Па; γ_0 – відносна умовно-миттєва деформація.

Модуль еластичності визначають за формулою:

$$G_{ел} = \frac{\tau}{\gamma_{ве}}, \quad (4.13)$$

де $G_{ел}$ – модуль еластичності, Па; $\gamma_{ве}$ – відносна високоеластична деформація.

Пластичну в'язкість визначають за формулою:

$$\eta_0^* = \frac{\tau}{tg\alpha}, \quad (4.14)$$

де η_0^* – пластична в'язкість, $\text{Па} \cdot \text{с}$; $tg\alpha$ – кут нахилу кінцевої лінійної ділянки кривої до осі абсцис.

В'язкість пружної післядії визначають за формулою:

$$\eta_{np} = \frac{\tau}{tg\beta}, \quad (4.15)$$

де η_{np} – в'язкість пружної післядії, $\text{Па} \cdot \text{с}$; $tg\beta$ – кут нахилу початкової лінійної ділянки кривої до осі абсцис.

4.5 Модифіковані ваги Каргіна-Соголової

Будова та принцип дії. Загальний вигляд ваг Каргіна-Соголової зображено на рис. 4.8.

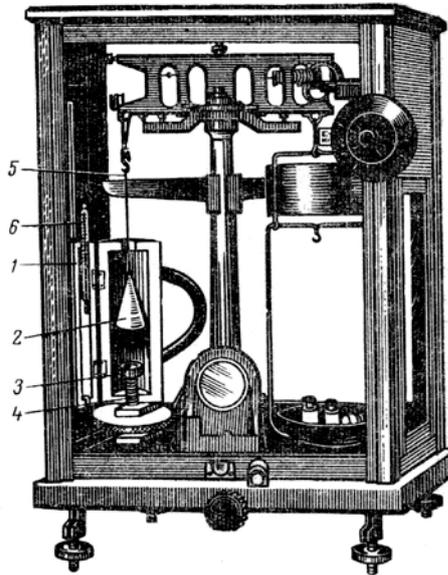


Рисунок 4.8 – Модифіковані ваги Каргіна-Соголової: 1 – термостатна камера; 2 – пуансон; 3 – підйомна підставка; 4 – гвинт для регулювання висоти підставки; 5 – нитка, на якій підвішений пуансон; 6 – термометр

Принцип дії заснований на деформації стиснення під дією пуансона. Ваги врівноважують, після чого з шальки знімають необхідну гирьку 4 – саме на таку масу пуансон 6 стає важчий та діє на зразок 7, який розміщують на підставці 9 (рис. 4.9). Спостереження ведуть за зміщенням стрілки 5 за допомогою мікроскопа 10.

Перше значення абсолютної деформації одержують за допомогою мікроскопа миттєво, як тільки навантаження починає діяти на зразок. Після цього періодично (через 1 хв) знімають значення абсолютної деформації протягом 10 хв. Подальші спостереження можна вести з періодичністю 5 хв. Після повернення на шальку гирьки фіксують миттєву деформацію, а потім аналогічно знімають покази приладу, з тією частотою як і під час навантаження. Дослідження припиняють, якщо протягом 30 хвилин не вдалось зафіксувати зміну абсолютної деформації.

Під час дослідження структурно-механічних характеристик модельних систем, напівфабрикатів та готової продукції необхідно підібрати фіксоване навантаження для всіх систем, що вивчаються, тобто навантаження для всіх зразків повинно бути однаковим. Крім цього, важливо також забезпечити однакову температуру та висоту зразків. Для визначення структурно-механічних показників будують залежність відносної деформації від часу дії напруги $\varepsilon = f(t)$.

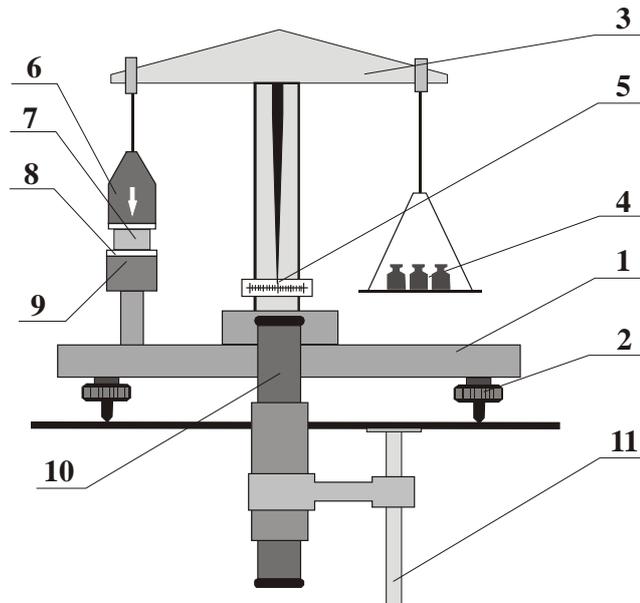


Рисунок 4.9 – Принципова схема модифікованих ваг Каргіна-Соголової: 1 – основа терезів; 2 – регулювальний гвинт; 3 – коромисло; 4 – гирі; 5 – стрілка; 6 – пуансон; 7-досліджуваний зразок; 8 – фторопластова пластинка; 9 – підйомна підставка; 10 – окуляр мікроскопа; 11 – штатив

Відносну деформацію визначають за формулою:

$$\varepsilon = \frac{a \cdot n}{h}, \quad (4.16)$$

де a – кількість поділок шкали; n – ціна поділки шкали, м; h – висота зразка, м.

Розділення загальної деформації на зворотну і незворотну проводять шляхом екстраполяції лінійної ділянки графіку $\varepsilon = f(t)$ на вісь ординат (рис. 4.10)

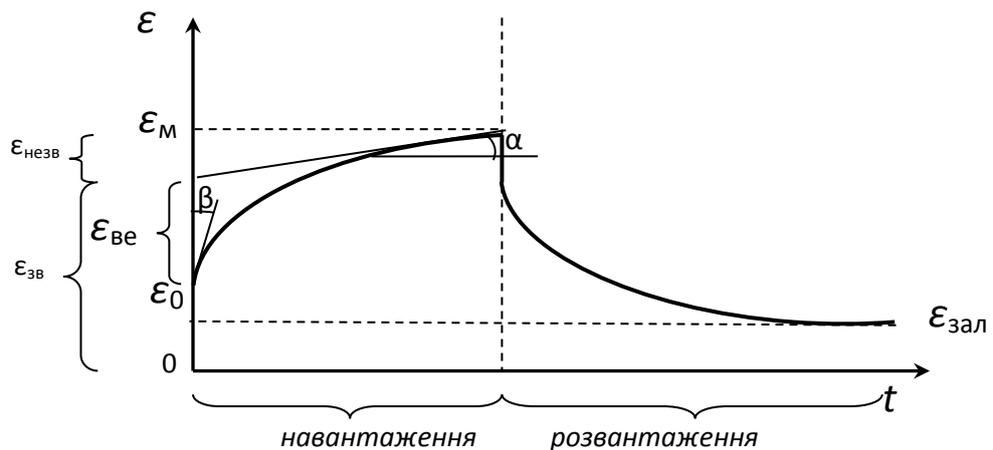


Рисунок 4.10 – Крива повзучості дослідного зразка під дією прикладеної напруги, що діє по нормалі (за навантаження та розвантажування)

Коефіцієнт відношення зворотної деформації до загальної визначають за формулою:

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{зв}}{\varepsilon_{заг}}, \quad (4.17)$$

де $\varepsilon_{зв}$ – величина зворотної деформації; $\varepsilon_{м}$ – величина максимальної деформації.

Напруження на зразок визначають за формулою:

$$\sigma = \frac{m \cdot g}{S}, \quad (4.18)$$

де σ – напруження на зразок, Па; m – маса вантажу, кг; g – прискорення вільного падіння, м/с²; S – площа перетину зразку, м².

Модуль миттєвої пружності визначають за формулою:

$$E_{пр} = \frac{\sigma}{\varepsilon_o}, \quad (4.19)$$

де $E_{пр}$ – модуль миттєвої пружності, Па; ε_o – відносна умовно-миттєва деформація.

Модуль еластичності деформації визначають за формулою:

$$E_{ел} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ве}}, \quad (4.20)$$

де $E_{ел}$ – модуль еластичності, Па; $\varepsilon_{ве}$ – відносна високоеластична деформація.

Пластичну в'язкість визначають за формулою:

$$\eta_0^* = \frac{\sigma}{tg\alpha}, \quad (4.21)$$

де η_0^* – пластична в'язкість, Па·с; $tg\alpha$ – кут нахилу кінцевої лінійної ділянки кривої до осі абсцис.

В'язкість пружної післядії визначають за формулою:

$$\eta_{пр} = \frac{\sigma}{tg\beta}, \quad (4.22)$$

де $\eta_{пр}$ – в'язкість пружної післядії, Па·с; $tg\beta$ – кут нахилу початкової лінійної ділянки кривої до осі абсцис.

4.6 Пенетрометр “Labor”

Пенетрацією називається метод дослідження структурно-механічних властивостей напівтвердих і твердих продуктів шляхом визначення опору продуктів проникненню в них інденторів (конусу, кулі, голки, циліндра) зі суворо визначеними розмірами, масою і матеріалом з точно визначеною температурою і за визначений час. Дослідження може проводитися з постійним зусиллям пенетрації (при цьому визначається глибина занурення); з постійною глибиною занурення (вимірюється зусилля); з постійною швидкістю занурення (реєструється зусилля залежно від глибини занурення). На цій основі розраховуються різні параметри, що мають відношення до консистенції.

Будова та принцип дії. Пенетрометр складається з корпусу 1 на трьох опорних ніжках: однією нерегульованою 2 і двома регульованими 3 для вивірення на горизонтальність за допомогою рівня 4. Пенетрометр має підйомний столик 5 для підведення зразків до індентора 7 закріпленого на стрижні 8 з мікрошкалою 10, має вмикач напруги 17 та кнопку пуску індентора 18. Для фіксування значень приладу пенетрометр має екран спостереження 14, а для освітлення дослідного зразка – освітлювальний екран 16. Принцип дії ґрунтується на вільному зануренні (проникненні) індентора в дослідний зразок за визначений час. Метод занурення конуса для характеристики структурно-механічних властивостей в'язкопластичних тіл був запропонований Ребіндером.

Проведення досліджень. За допомогою вимикача 17 подають напругу до екрану спостереження 14, на якому видно шкалу 10 екрану підсвічування зразка 16 та на котушку електромагніту 15. На стрижні закріплюють вибраний індентор і переміщують його в ручному режимі, виставляючи на «0» за шкалою спостереження 10. Дослідний зразок у спеціальній посудині (висота якої вище 35 мм) встановлюють на підйомний столик, а потім за допомогою штурвала 6 зразок підводять до контакту індентора з поверхнею зразка. Після чого кнопкою пуску 18 звільнюють індентор, що починає занурюватися у зразок, час занурення складає 5 с. Значення величини пенетрації фіксуються на екрані спостереження.

За допомогою пенетрометра знаходиться гранична напруга зсуву як одна з важливих реологічних характеристик матеріалу, що використовуються для оцінки міцності його структури. Крім того, граничну напругу зсуву доцільно визначати перед початком досліджень на вагах Каргіна-Соголової для встановлення нижньої межі навантаження, за якого досліджуваний зразок починає текти. При визначенні граничної напруги зсуву на пенетрометрі з метою визначення нижньої межі навантаження для дослідження зразків на еластопластометрі Толстого, необхідно отримане значення граничної напруги зсуву поділити на 3, виходячи з того, що модуль зсуву та модуль пружності пов'язані через коефіцієнт Пуассона $E \approx 3 \cdot G$, а, отже, і гранична напруга зсуву, що визначається по нормалі в три рази більша, ніж гранична напруга зсуву, що визначається дотично.

Гранична напруга зсуву (ГНЗ) незруйнованої структури σ_0 (Па) розраховується за формулою Ребіндера:

$$\sigma_0 = k \frac{m \cdot g}{h^2}, \quad (4.23)$$

де m – маса індентора і стержня приладу, яка діє на дослідний продукт (за мінусом тертя і опору пружини індентора), кг; g – прискорення вільного падіння м/с²; h – глибина занурення конуса, м; k – константа індентора (табл.4.5).

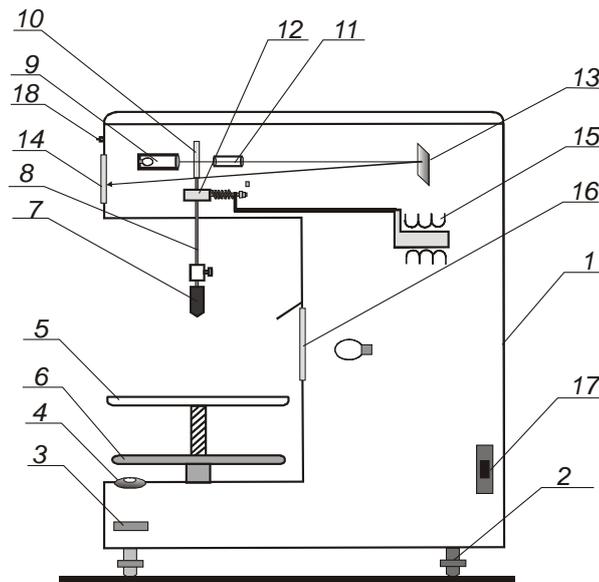


Рисунок 4.12 – Пенетромтр Labor: 1 – корпус; 2 – ніжка нерегульована; 3 – гвинт ніжки регульованої 4 – рівень; 5 – підйомний столик; 6 – штурвал підйомного столика; 7 – індентор; 8 – стрижень; 9 – джерело світла; 10 – мікроскала; 11 – конденсор; 12 – фіксатор; 13 – дзеркало; 14 – екран для спостереження; 15 – електромагнітна котушка; 16 – екран для освітлення зразка; 17 – вмикач пенетрометра; 18 – кнопка пуску індентора

Таблиця 4.5 – Залежність константи індентора від кута з вершиною [14]

Константа індентора	Кут з вершиною конуса α , град			
	30	45	60	90
К	0,456	0,286	0,164	0,0657

На пенетрометрі проведено велику кількість досліджень реологічних властивостей різних харчових продуктів (цукеркові маси, хлібопекарське і кондитерське тісто, м'ясні і молочні продукти, пшеничний хліб, косметичні креми, продукти переробки винограду і яблук, фрукти). На основі значення граничної напруги зсуву запропоновано таку класифікацію матеріалів (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Класифікація матеріалів за величиною ГНЗ [18]

Напруження зсуву, $\sigma_0 \cdot 10^{-2}$, Па	Оцінка дослідного матеріалу
<50	Дуже м'який, майже текучий
50...100	Дуже м'який, але не розмашується
100...200	М'який, розмашується
200...800	Пластичний, розмашується
800...1000	Твердий, але зі здатністю до розмашування
1000...1500	Достатньо твердий з обмеженою здатністю до розмашування
>1500	Значно твердий

5. ВИКОРИСТАННЯ ТАБЛИЧНОГО РЕДАКТОРА EXCEL ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ РЕОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Математично-статистична обробка результатів реологічних досліджень

Одним з основних етапів будь-якого експерименту є статистична обробка даних. Вона спрямована на побудування математичної моделі об'єкта чи явища, що досліджується, яка поєднує як апіорну, так і експериментальну інформацію. Залежно від мети експерименту (дослідження, контролю, управління) математична модель може бути використана по-різному: для предметно-змістовного аналізу, для прогнозування стану об'єкта чи явища, управління ним або оптимізації параметрів, для контролю стану та ін.

Застосування статистичних методів обробки експериментальних даних вимагає знання основних положень теорії ймовірності та математичної статистики. Обчислення параметрів навіть достатньо простих залежностей (лінійна, квадратична) вимагає значного часу. Тому бажано використовувати ПЕОМ з пакетом прикладних програм, щоб позбавити експериментатора від рутинної роботи [2;12]. Проте, використання ПЕОМ не звільняє дослідника від аналізу одержаних результатів та придатності встановлених залежностей для кількісної характеристики та прогнозу показників, які досліджуються.

Під час експериментального (емпіричного) вивчення математичної залежності однієї властивості від іншої проводять декілька вимірів величини властивості y за різних значень величини властивості x . Задача полягає у підборі формули, що описує результати експерименту якомога точніше. Тобто задача зводиться до знаходження рівняння, яке найкращим чином апроксимує результати вимірів. Найчастіше використовують апроксимацію методом найменших квадратів для лінійної або квадратичної залежності. Поліноми більш високого ступеня рідко зустрічаються в технологічних процесах [4;22].

Для знаходження рівняння виду:

$$y = kx + b, \quad (5.1)$$

яке б максимально точно описувало результати експерименту, необхідно мінімізувати суми різниці квадратів експериментальних даних і значень апроксимуючої лінійної функції:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2 \rightarrow \min, \quad (5.2)$$

де y_i – експериментальне значення результуючої ознаки при значенні чинникової ознаки x_i ; $f(x_i)$ – значення апроксимованої лінійної функції при x_i .

З умови мінімуму система рівнянь для визначення найкращих значень параметрів рівняння прямої (5.1) a і b має вигляд:

$$\begin{cases} b \cdot n + k \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ b \cdot \sum_{i=1}^n x_i + k \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i), \end{cases} \quad (5.3)$$

де n – кількість експериментальних значень результуючої ознаки. Вирішивши систему рівнянь (5.2), знаходимо :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}, \quad (5.4)$$

$$b = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (5.5)$$

У тому випадку, коли гіпотеза лінійності рівняння регресії може бути відкинута, чи коли при графічному зображенні точок чітко видно нелінійність, є сенс для апроксимації експериментальних даних, використовуючи рівняння вигляду:

$$y = ax^2 + bx + c. \quad (5.6)$$

Із умови мінімуму суми квадратів відхилень система нормальних рівнянь для визначення найкращих параметрів рівняння квадратичної форми має вигляд:

$$\begin{cases} a \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^2 + b \cdot \sum_{i=1}^n x_i + c \cdot n = \sum_{i=1}^n y_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^3 + b \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^2 + c \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n (y_i \cdot x_i) \\ a \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^4 + b \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^3 + c \cdot \sum_{i=1}^n (x_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i \cdot (x_i)^2) \end{cases} \quad (5.7)$$

Для знаходження коефіцієнтів a , b , c користуються методом визначників, за яким

$$a = \frac{\Delta_a}{\Delta}; \quad b = \frac{\Delta_b}{\Delta}; \quad c = \frac{\Delta_c}{\Delta}, \quad (5.8)$$

$$\text{де } \Delta = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i & n \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}; \quad (5.9)$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n x_i & n \\ \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 \cdot y_i) & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}; \quad (5.10)$$

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i & n \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n (x_i^2 \cdot y_i) & \sum_{i=1}^n x_i^2 \end{vmatrix}; \quad (5.11)$$

$$\Delta_c = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n (x_i \cdot y_i) \\ \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n (x_i^2 \cdot y_i) \end{vmatrix}. \quad (5.12)$$

Якщо ні лінійна, ні квадратична регресії не дають бажаної точності, використовують інші види залежностей. Найчастіше в реології використовують степеневу та експоненційну. Їх в результаті відповідних перетворень можна звести до лінійних (лінеалізувати).

Так, залежність

$$y = kx^m \quad (5.13)$$

лінеалізується шляхом логарифмування:

$$\lg y = m \cdot \lg x + \lg k. \quad (5.14)$$

Після чого методом найменших квадратів за формулами (5.4;5.5) знаходяться коефіцієнти рівняння регресії.

Для залежності

$$y = ke^{ax} \quad (5.15)$$

лінеалізоване рівняння матиме вигляд:

$$\ln y = \ln k + ax. \quad (5.16)$$

Після знаходження прямої методом найменших квадратів за формулами (5.3...5.4), виконуються зворотні перетворення.

Для перевірки значущості (адекватності) рівняння апроксимації в цілому використовується F-критерій Фішера. При цьому порівнюється загальна S_y^2 та залишкова $S_{зал}^2$ дисперсії. Залишкова дисперсія являє собою показник помилки передбачення рівнянням регресії результатів досліду. Якість передбачення визначається порівнюючи $S_{зал}^2$ з S_y^2 іншими словами F-критерій Фішера показує у скільки разів рівняння апроксимації збігається з результатами дослідів краще, ніж середнє значення \bar{y} .

Для того, щоб рівняння регресії адекватно описувало результати експериментів, необхідно, щоб дотримувалась умова:

$$F_p = \frac{S_y^2}{S_{зал}^2} > F_m(\alpha; \nu_1; \nu_2), \quad (5.17)$$

де S_y^2 – загальна дисперсія результуючої ознаки визначається:

$$S_y^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (5.18)$$

де n – кількість експериментальних даних; y_i – експериментальне значення результуючої ознаки; \bar{y} – середнє значення результуючої ознаки; $S_{зал}^2$ – залишкова дисперсія визначається:

$$S_{зал}^2 = \frac{1}{n-m} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i))^2, \quad (5.19)$$

де $f(x_i)$ – значення результуючої ознаки, розрахованої за рівнянням регресії при значенні чинникової ознаки x_i ; m – кількість невідомих параметрів у рівнянні регресії,

$$m = k + 1, \quad (5.20)$$

де k – порядок апроксимуючого поліному.

$F_m(\alpha; \nu_1; \nu_2)$ – табличне значення F-критерію при рівні значущості α із степенем свободи у чисельнику:

$$\nu_1 = n - 1 \quad (5.21)$$

у знаменнику:

$$\nu_2 = n - m = n - k - 1. \quad (5.22)$$

Мірою точності емпіричної залежності може бути середній відсоток відхилень розрахункових та експериментальних значень величини, яка контролюється у дослідженні:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{|y_{ie} - f(x_i)|}{f(x_i)} \right) \cdot 100\%, \quad (5.23)$$

де n – кількість експериментальних даних; y_{ie} – експериментальне значення результуючої ознаки; $f(x_i)$ – значення результуючої ознаки, розрахованої за рівнянням регресії при значенні чинникової ознаки x_i .

У випадку, коли декілька емпіричних залежностей адекватно (статистично вірогідно) описують результати експерименту, перевагу віддають тій залежності, за умов використання якої залишкова дисперсія найменша, при практично рівних значеннях залишкових дисперсій перевагу віддають більш простій залежності.

5.2 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на ротаційному віскозиметрі ВПН-0,2М

Для автоматизації розрахунків пропонується використання табличного редактора Microsoft Excel, в середовищі якого розроблені файли під відповідні прилади. Вважається, що користувач володіє базовими знаннями на рівні користувача Excel.

Для автоматизації розрахунків реологічних характеристик використовується файл `viskozimetr_VPN-0,2M.xls`. Файл містить наступні листи:

1. введення даних;
2. математична обробка;
3. визначення напруження зсуву;
4. дослідження в'язкості;
5. дослідження тиксотропності;
6. вихідні дані.

Файл розрахований на шість графічних залежностей (зразків), або три – під час дослідження в'язкості прямого та зворотного ходу. Для кожної залежності розроблено блоки введення даних, розрахунку показників, математичної та статистичної обробки даних.

Необхідно зазначити, що тільки поля жовтого та синього кольору – це поля введення даних (рис. 5.1.). У стовпчику А, інколи і в В, вказано, що в даному рядку необхідно ввести, або розрахунок чого ведеться. Змінювати, вводити дані та проводити інші операції, крім зазначених нижче, з невиділеними кольором – не допустимо для нормальної роботи розрахунку. Отже, дотримуючись чітких дій, дослідник швидко та без особливих затрат часу отримає реологічні характеристики систем, що досліджувалися.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2	Введіть розмір вузла	40	A	K, ПаВ									
3	Введіть назву зразку	18	0,00747	4,42									
4	U, В	9,42	9,58	9,75	10,11	10,52	10,98	11,3	11,76	12,11	12,88	14,73	15,78
5		9,4	9,55	9,76	10,12	10,53	10,99			12,1	12,89	14,72	15,83
6	Сер.ариф. значення U, В	9,410	9,565	9,755	10,115	10,525	10,985	11,300	11,760	12,105	12,885	14,725	15,805
7	T, мс.	8669	6869	5829,5	4778	3663	3026	2661	2308	2040	1662	1128	886
8		7875	6605	5567	4558	3604	2950	2606	2253	2027	1642	1113	873
9													
10													
11													
12	Сер.ариф. значення T, с	8,272	6,737	5,698	4,668	3,634	2,988	2,634	2,281	2,034	1,652	1,121	0,880
13	Швидк. зсуву, с ⁻¹	16,183	19,871	23,493	28,678	36,843	44,802	50,833	58,702	65,832	81,034	119,472	152,210
14	В'язкість, Па×с	2,570	2,128	1,835	1,559	1,263	1,084	0,983	0,885	0,813	0,703	0,545	0,459
15													
16													
17	Введіть розмір вузла		A	K, ПаВ									
18	Введіть назву зразку		Невірно в	Невірно введено розмір вузла									
19	U, В												
20													
21	Сер.ариф. значення U, В												
22													
23	T, мс.												
24													
25													
26													
27	Сер.ариф. значення T, с												
28	Швидк. зсуву, с ⁻¹												
29	В'язкість, Па×с												
30													

Рисунок 5.1 – Лист введення даних файлу viskozimetr_VPN-0,2M.xls

На листі введення даних розроблено блоки введення даних для розрахунку в'язкості від швидкості зсуву, порядок введення даних наступний:

- у поля синього кольору, ввести розмір вузла (20 або 40, або 100) та назву зразка, виражену числом від 0 до 10^{37} .
- у поля жовтого кольору нижче назви зразка ввести значення напруги у Вольтах (одне або два), яку знімають з табло вольтметра. У полях, не виділених кольором, нижче полів введення напруги розраховується середнє арифметичне значення;
- у поля жовтого кольору, які розміщені нижче визначення середнього арифметичного напруги, ввести значення періоду обертання (T), не менше 3

та не більше 5 (в мс), які знімають за допомогою частотоміру. Нижче полів введення T розраховується середнє арифметичне значення (в с), швидкість зсуву (с^{-1}) за формулою (4.2) та ефективна в'язкість ($\text{Па}\cdot\text{с}$) за формулою (4.1).
 - кожний блок розрахований на 12 експериментальних точок. У випадку меншої кількості експериментальних точок необхідно:

1. виділити всі незаповнені поля жовтого кольору та безбарвні поля на листі введення даних та очистити їх від формул.
2. виділити незаповнені поля (або поля з нулями) в блоках на листі математична обробка, визначення напруги зсуву та очистити їх за допомогою клавіші Del.

Після введення експериментальних даних автоматично проводиться обробка та будуються діаграми. На листі введення даних для кожного зразка будується два графіка: за експериментальним даним у вигляді маркерів та у вигляді згладженої лінії за рівнянням по результатам математичної обробки експериментальних даних.

Математична та статистична обробка експериментальних даних

Для описання залежності в'язкості від швидкості зсуву для неньютонівських рідин нами обрано рівняння Гершеля-Балклі $\eta_{ef} = K\dot{\gamma}^{n-1}$, причому $n-1 = m$. Для апроксимації залежності, що описується даним рівнянням, воно лінеалізується з отриманням рівняння вигляду (5.14). Результати в логарифмічному вигляді автоматично приводяться на діаграмі нижче блоків математичної обробки (рис. 5.2). Після логарифмування автоматично обчислюються коефіцієнти k і b в рівнянні за формулами (5.4, 5.5). Статистичний аналіз здійснюється автоматично нижче блоку математичної обробки за формулами (5.17-5.22). Перевірка адекватності описання рівнянням експериментальних даних здійснюється автоматично нижче блоку статистичної обробки за формулою (5.17).

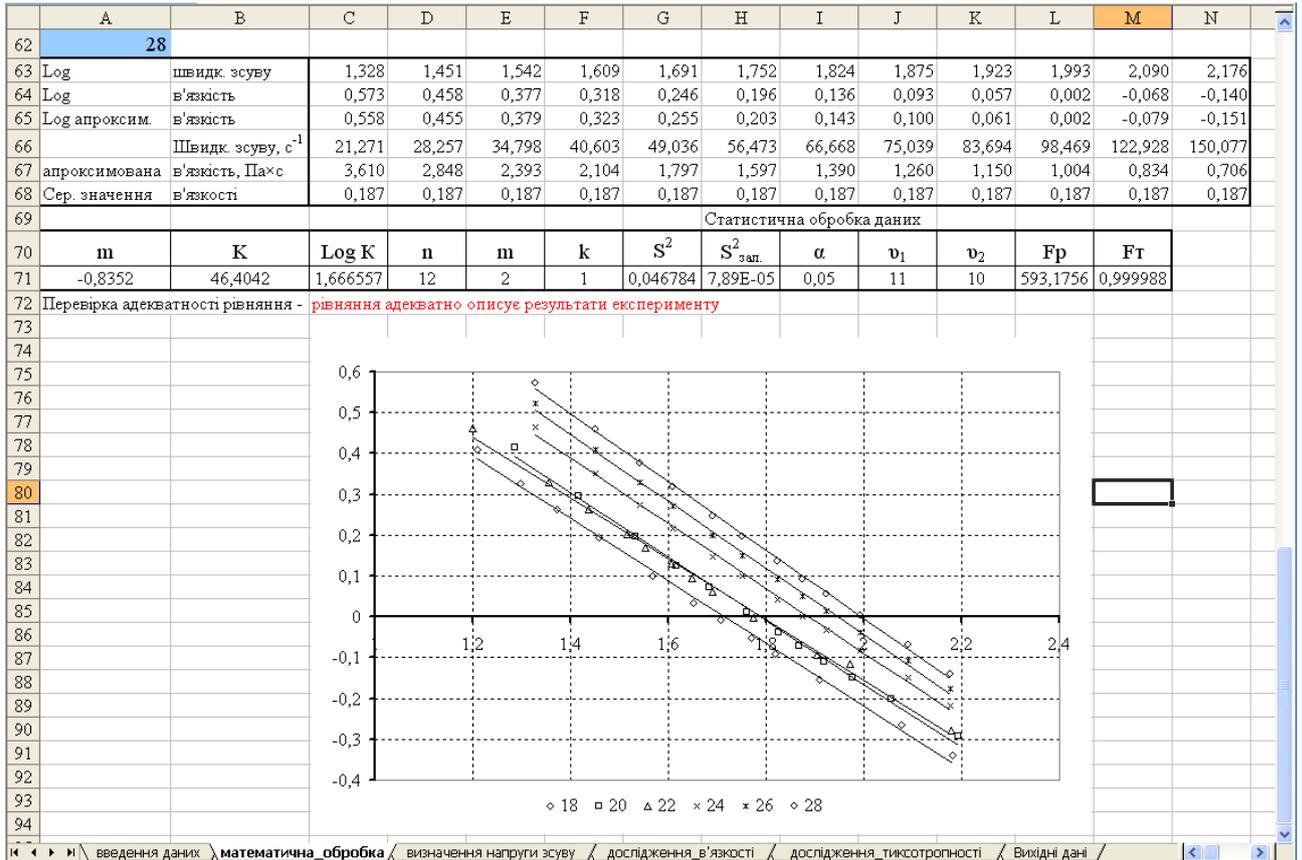


Рисунок 5.2 – Лист математична обробка

На листі визначення напруги зсуву розраховується значення напруги зсуву за рівнянням Гершеля-Балклі та будується графік залежності напруги зсуву від швидкості зсуву за результатами математичної обробки (рис. 5.3).

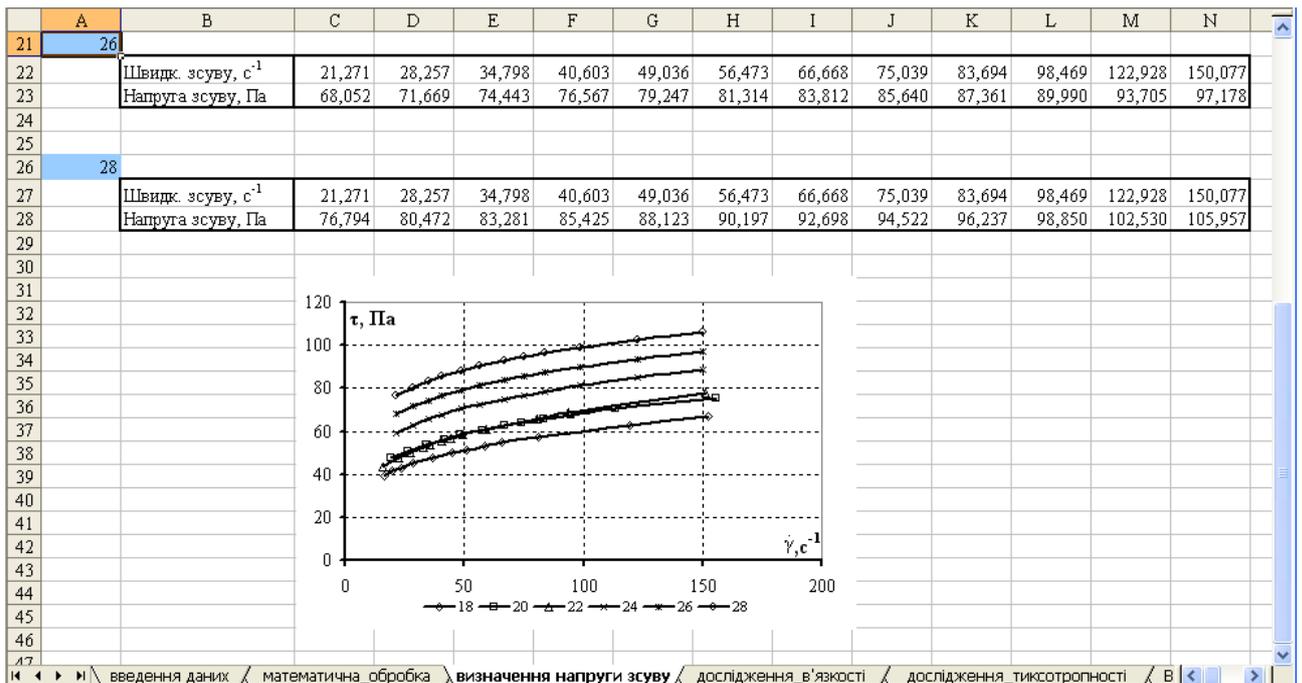


Рисунок 5.3 – Лист визначення напруги зсуву

На листі дослідження в'язкості наведено таблицю значень K , n , m , що можуть використовуватись для аналізу та побудови графічних залежностей. Ми вважали за необхідне отримання графіка залежності в'язкості від параметру, що досліджується, з певною швидкістю зсуву. Для цього необхідно ввести швидкість зсуву у поле жовтого кольору F8, за якою, автоматично розраховується в'язкість для всіх зразків.

Результати залежності в'язкості від параметру, що досліджується, виводяться на діаграмі. Якщо значень менше 6 то незаповнені поля таблиці A10:G11 необхідно очистити від формул (рис. 5.4.).

Математична обробка та вибір функції апроксимації

У рамках даних файлів для описання залежностей у вузьких інтервалах використовується чотири рівняння апроксимації (5.1, 5.6, 5.13, 5.15):

Для визначення, яким саме рівнянням описати отримані експериментальні дані, проводиться статистичний аналіз. Для кожного рівняння є свій блок автоматичних статистичних розрахунків (рис. 5.4).

Розрахунок коефіцієнтів k і b в рівнянні (5.1) автоматично здійснюється за формулами (5.4, 5.5), статистична обробка для кожного рівняння – за формулами (5.17-5.23), перевірка адекватності – нижче блоку статистичних розрахунків.

Для рівняння (5.6) значення коефіцієнтів a , b , c розраховуються автоматично за формулами (5.8-5.12), визначники на листі розділені границями (рис. 5.4).

Розрахунок коефіцієнтів k і b у рівнянні (5.13), здійснюється шляхом лінеалізування рівняння до вигляду (5.14), а потім коефіцієнти в лінеалізованому рівнянні визначаються автоматично за формулами (5.4, 5.5).

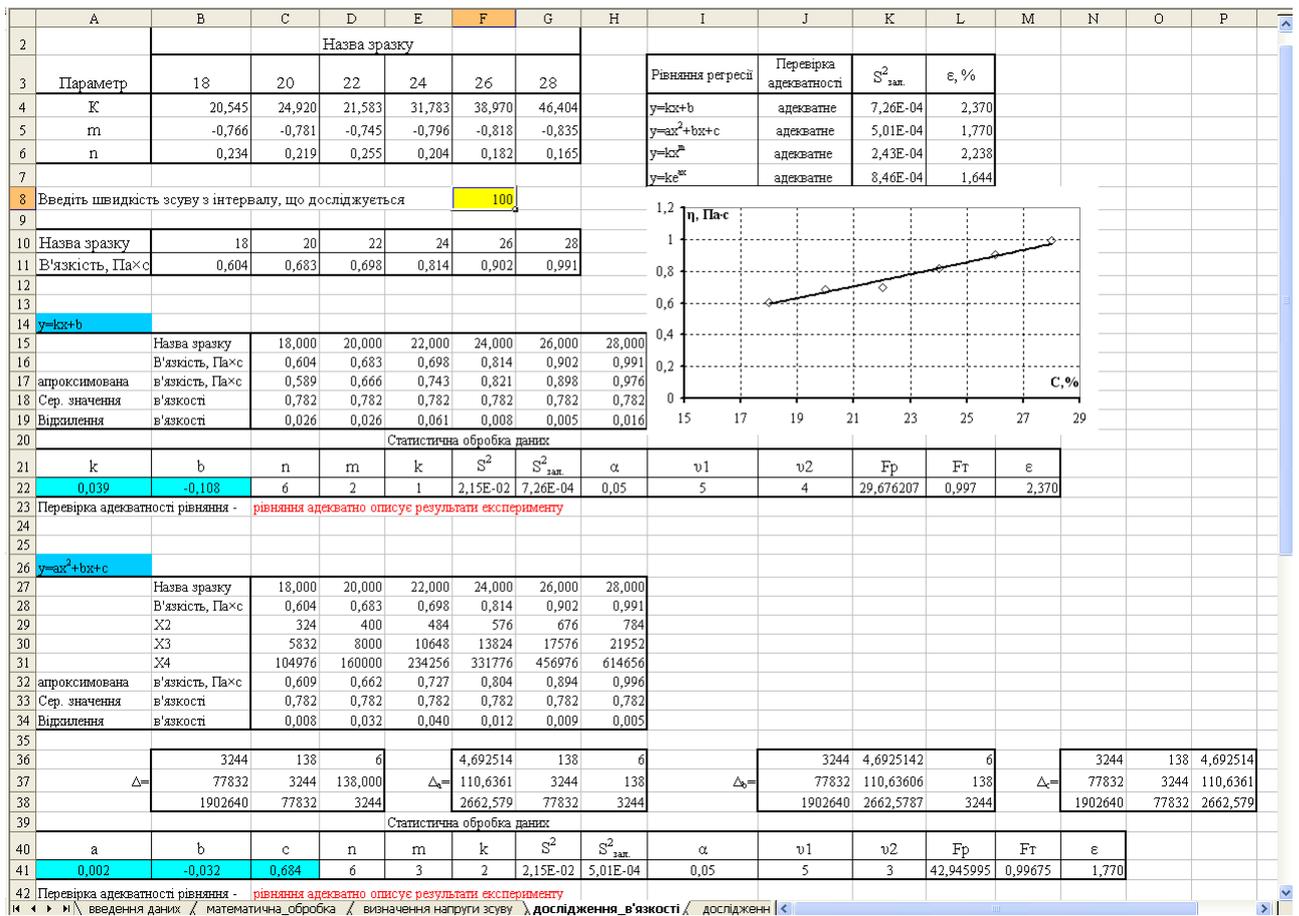


Рисунок 5.4 – Лист дослідження в'язкості файлу viskozimetr_VPN-0,2M.xls

Розрахунок коефіцієнтів k і a в рівнянні (5.15), здійснюється шляхом лінелізування рівняння до вигляду (5.16), а потім коефіцієнти в цьому рівнянні автоматично визначаються за формулами (5.4, 5.5).

Для кращої наочності під час вибору рівняння регресії формується таблиця (рис. 5.4), в якій наведено порівняння табличного значення критерію Фішера з розрахунковим значенням. У випадку адекватності – рівняння значуще описує результати експерименту. У випадку декількох адекватних рівнянь, необхідно вибрати рівняння, при якому квадрат залишкової дисперсії ($S^2_{\text{зал}}$) мінімальний, або більш простіше рівняння.

Для побудови рівняння апроксимації можна використати значення обраного рівняння у рядку апроксимована (рис. 5.4), а змінні у рядку назва зразку, або побудувати лінію тренда вигляду, що відповідає результатам статистичної обробки.

Після завершення введення даних потрібно перевірити всі діаграми на наявність випадкових помилок, пов'язаних з введенням даних, відредагувати діаграми, зокрема, осі. Ввести назву осі на листі дослідження в'язкості і т.п.

На листі дослідження тиксотропності розраховують коефіцієнт тиксотропності за формулою (3.3) (рис. 5.5):

- для цього значення періоду та напруги прямого ходу вводять в непарні блоки (1,3,5), а значення періоду та напруги зворотного ходу в парні блоки (2,4,6), наприклад 1 – прямий хід, 2 – зворотний хід;

- назву зразків вводити тільки у непарні поля;
- на листі дослідження тиксотропності в поле F8 ввести мінімальне значення швидкості зсуву з інтервалу, що досліджується.
- значення коефіцієнтів тиксотропності виводяться в таблиці A10:D11.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2							
3	Параметр	18	22	26			
4	K	20,545	24,920	21,583	31,783	38,970	46,404
5	m	-0,766	-0,781	-0,745	-0,796	-0,818	-0,835
6	n	0,234	0,219	0,255	0,204	0,182	0,165
7							
8	Введіть мінімальну швидкість зсуву з інтервалу, що досліджується					20	
9							
10	Назва зразку	18	22	26			
	Коефіцієнт						
11	тиксотропності, %	86,29	79,04	88,52			

Рисунок 5.5 – Лист дослідження тиксотропності файлу viskozimetr_VPN-0,2M.xls

На листі вихідні дані містяться коефіцієнти та константи вузлів, що використовуються у формулах для розрахунку реологічних показників.

5.3 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на ротаційному віскозиметрі типу RN

Для автоматизації розрахунків реологічних характеристик використовується файл viskozimetr_RN.xls. Файл містить ті ж самі листи, що і viskozimetr_VPN-0,2M.xls, окрім одного - дослідження тиксотропності.

Математична обробка на всіх етапах здійснюється аналогічно тому, як описано в пункті 5.2. Відрізняється тільки лист введення даних. Для дослідження в'язкості та побудови залежності в'язкості від швидкості зсуву використовують до 8 точок, що обумовлено можливістю даного приладу. На листі введення даних розроблено 6 блоків для розрахунку в'язкості (рис. 5.6). Порядок введення даних:

- у поля синього кольору ввести назву зразка в чисельному вираженні;
- у поля жовтого кольору ввести назву вимірювального вузла у вигляді прописної літери (на англійській розкладці клавіатури) та цифри (без пробілу);
- ввести значення позиції, при якій проводились вимірювання в'язкості;
- порядок введення значень для отримання залежності в'язкості від швидкості зсуву прямого ходу наведено в табл. 5.1.
- ввести значення кута відхилення, який знімають з циферблату віскозиметра;

- нижче поля введення кута відхилення на основі введення назви із бази даних, яка міститься на листі **вихідні дані**, автоматично вибирається постійна для даного вузла;
- нижче рядка константа вузла автоматично здійснюється розрахунок швидкості зсуву за формулою (4.5) на основі введених значень назви вузла та позиції перемикача;
- розрахунок в'язкості здійснюється автоматично нижче полів розрахунку швидкості зсуву за формулою (4.4);
- якщо експериментальних точок менше 8, необхідно очистити від формул забарвлені та незабарвлені поля блоків, теж саме зробити на листах математична обробка, визначення напруги зсуву. Але необхідно пам'ятати, що не рекомендується використовувати менше 5 точок для вивчення залежності в'язкості від швидкості зсуву для неньютонівських систем;

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2									
3	Введіть назву зразку	0							
4	Введіть № позиції	10	4	2	1	10	4	2	1
5	Введіть назву вимірювального вузла	M2	M2	M2	M2	M1	M1	M1	M1
6	Значення кута відхилення α , рад.	24	29	37	41	41,7	46	52	66,5
7	Константа вузла z	0,79	0,79	0,79	0,79	0,89	0,89	0,89	0,89
8	Швидк. зсуву, c^{-1}	0,80	1,86	3,46	7,19	8,98	20,94	38,90	80,78
9	В'язкість, $Pa \cdot s$	23,749	12,299	8,449	4,508	4,117	1,947	1,185	0,730
10									
11									
12	Введіть назву зразку	3,5							
13	Введіть № позиції	10	4	2	1	10	4	2	1
14	Введіть назву вимірювального вузла	M2	M2	M2	M2	M1	M1	M1	M1
15	Значення кута відхилення α , рад.	25,1	30	39,5	46,5	41,4	44	63	76
16	Константа вузла z	0,79	0,79	0,79	0,79	0,89	0,89	0,89	0,89
17	Швидк. зсуву, c^{-1}	0,80	1,86	3,46	7,19	8,98	20,94	38,90	80,78
18	В'язкість, $Pa \cdot s$	24,838	12,723	9,020	5,113	4,088	1,862	1,435	0,834
19									

Рисунок 5.6 – Лист введення даних файлу viskozimetr _RN.xls

- у випадку дослідження менше 6 зразків необхідно очистити інші блоки від формул на листах введення даних, математична обробка, визначення напруги зсуву, а на листі дослідження в'язкості очистити незаповнені поля від формул у таблиці A10:G11. (рис. 5.7).
- відредагувати діаграми.

Таблиця 5.1 – Порядок введення даних для розрахунку в'язкості від швидкості зсуву прямого ходу (на підставі даних табл. 4.3)

Номер позиції	10	4	10	2	4	1	2	1
Назва вузла	N2	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N1
Номер позиції	10	4	2	1	10	4	2	1
Назва вузла	M2	M2	M2	M2	M1	M1	M1	M1
Номер позиції	10	4	10	2	4	1	2	1
Назва вузла	H2	H2	H1	H2	H1	H2	H1	H1

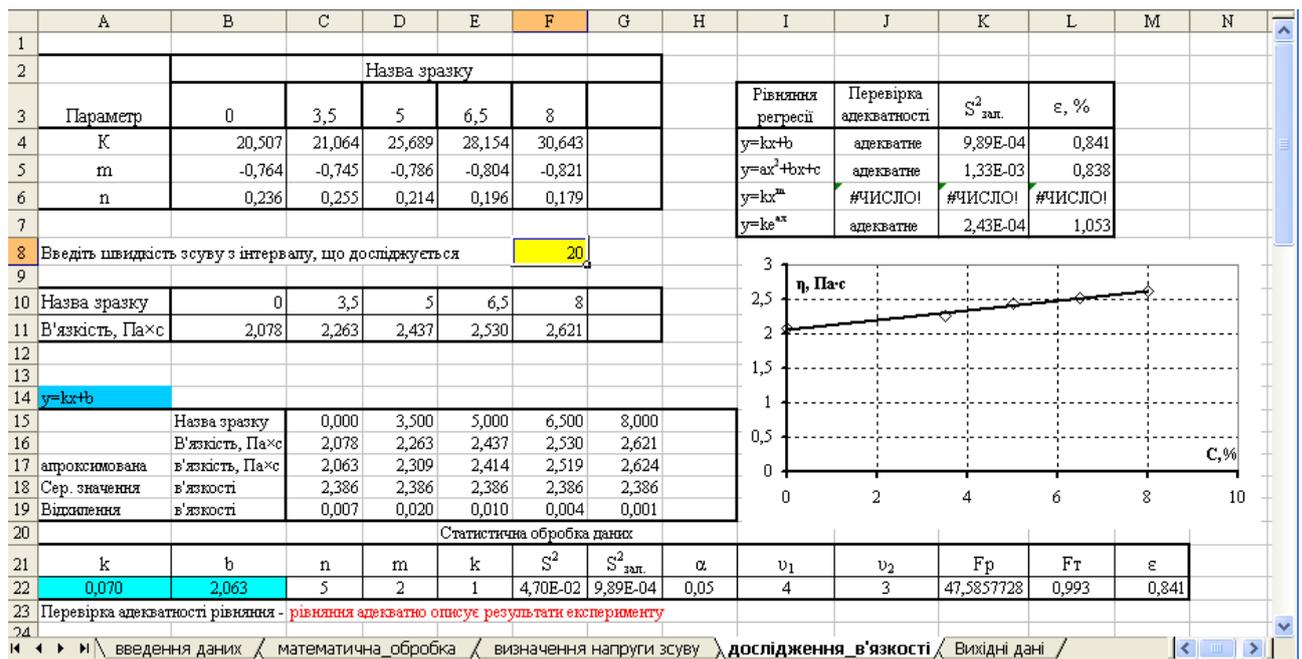


Рисунок 5.7 – Лист дослідження в'язкості файлу вискозиметр_RN.xls

5.4 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на реовіскозиметрі Геплера

Для автоматизації розрахунків в'язкості від температури використовується файл geoviskozimetr_Geplera.xls. Файл містить наступні листи:

- введення даних;
- математична обробка;
- вихідні дані.

Файл розрахований на шість графічних залежностей (зразків), по 12 експериментальних точок у кожній. Для кожної графічної залежності розроблено блок введення та обробки експериментальних даних (рис. 5.8).

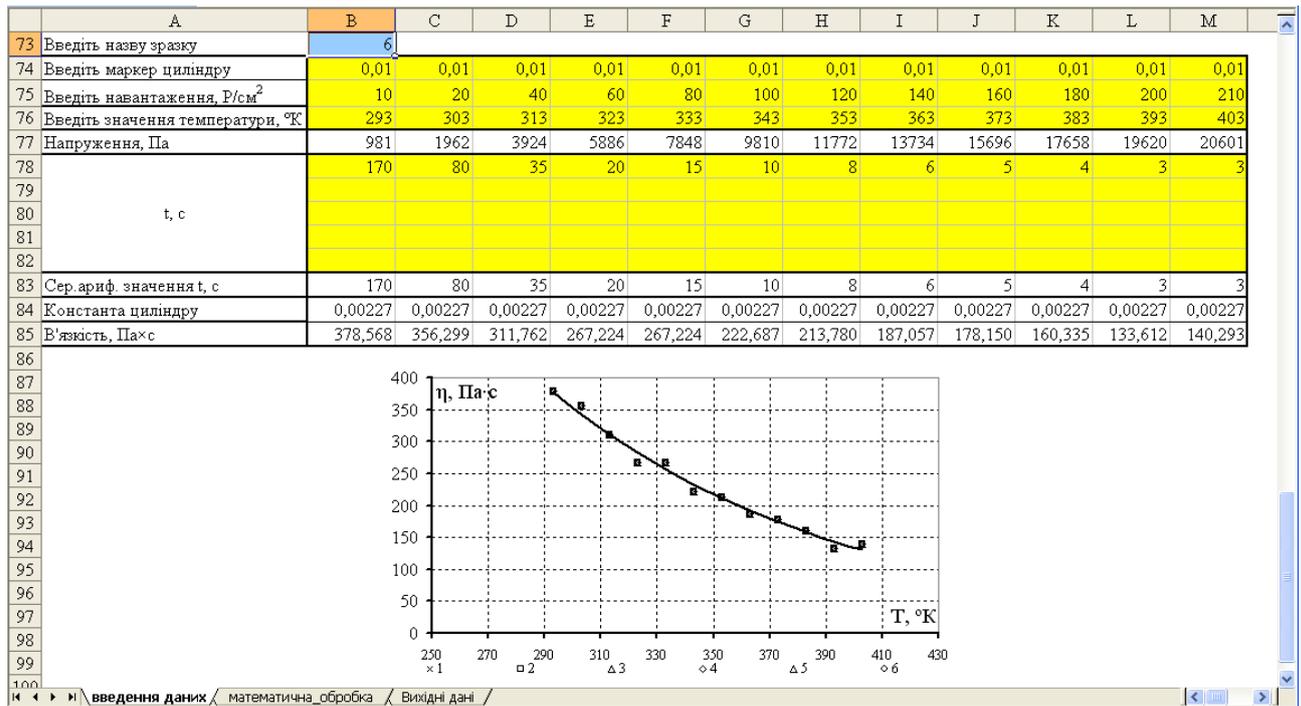


Рисунок 5.8 – Лист введення даних файлу reoviskozimetr_Geplera.xls

Порядок введення даних:

- у поля синього кольору ввести назву зразка в чисельному вираженні;
- у поля жовтого кольору ввести маркер циліндра, на якому проводяться дослідження;
- нижче маркера циліндра ввести значення навантаження в Р/см²;
- нижче значення навантаження ввести значення температури в °К;
- нижче поля введення температури автоматично розраховується напруження, що діє на зразок (в Па);
- нижче розрахунку напруження ввести значення періоду (в с), за який кулька проходить весь шлях (до п'яти значень);
- після введення періоду автоматично розраховується середньоарифметичне значення;
- нижче середньоарифметичного періоду занурення кульки із бази даних, яка міститься на листі **вихідні дані**, на основі введеного значення маркеру автоматично вибирається постійна для даного циліндру;
- нижче поля константа циліндра автоматично розраховується в'язкість за формулою (4.7);
- якщо експериментальних точок менше 12 необхідно очистити від формул забарвлені та незабарвлені поля блоків, теж саме зробити на листі **математична обробка**;
- у випадку дослідження менше 6 зразків необхідно очистити блоки від формул на листах **введення даних** та **математична обробка**;
- відредагувати діаграми.

Результати експерименту в графічному вигляді автоматично виводяться на діаграмі на листі **введення даних** у вигляді маркерів (рис.

5.8). Апроксимація експериментальних даних автоматично здійснюється на листі математична обробка (рис. 5.9) рівнянням (5.15), виходячи з того, що залежність в'язкості від температури для більшості неньютонівських рідин описується рівнянням Френкеля-Андріаде (3.4).

Для знаходження коефіцієнтів в експоненційному рівнянні автоматично здійснюється декілька операцій:

- логарифмується значення в'язкості;
- за методом найменших квадратів обчислюються коефіцієнти $\ln k$ та a в рівнянні вигляду (5.16);
- обчислюється k та апроксимовані значення функції;
- будуються графіки в напівлогарифмічній шкалі на листі математична обробка (для наочності) та на листі введення даних у вигляді експоненційної кривої апроксимації.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2	1													
3		температура, °K	293	303	313	323	333	343	353	363	373	383	393	403
4	Ln	в'язкість	5,936	5,876	5,742	5,588	5,588	5,406	5,365	5,231	5,183	5,077	4,895	4,944
5	Ln апроксим.	в'язкість	5,932	5,836	5,740	5,643	5,547	5,451	5,354	5,258	5,162	5,066	4,969	4,873
6		температура, °K	293	303	313	323	333	343	353	363	373	383	393	403
7	апроксимована	в'язкість, Па·с	376,989	342,381	310,950	282,404	256,479	232,933	211,550	192,129	174,491	158,472	143,924	130,712
8	Сер. значення	в'язкості	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403
9	Відхилення	в'язкості	1,00418743	1,04065	1,00261	0,94625	1,0419	0,95601	1,01054	0,9736	1,02097	1,01175	0,92835	1,0733
10	Статистична обробка даних													
11	a	K	Ln K	n	m	k	S ²	S ² зал.	α	v1	v2	Fp	Ft	
12	-0,0096	6333,4403	8,75359886	12	2	1	0,12239	0,00203	0,05	11	10	60,2987	0,99999	
13	Перевірка адекватності рівняння - рівняння адекватно описує результати експерименту													
14														
15	2													
16		температура, °K	293	303	313	323	333	343	353	363	373	383	393	403
17	Ln	в'язкість	5,936	5,876	5,742	5,588	5,588	5,406	5,365	5,231	5,183	5,077	4,895	4,944
18	Ln апроксим.	в'язкість	5,932	5,836	5,740	5,643	5,547	5,451	5,354	5,258	5,162	5,066	4,969	4,873
19		температура, °K	293	303	313	323	333	343	353	363	373	383	393	403
20	апроксимована	в'язкість, Па·с	376,989	342,381	310,950	282,404	256,479	232,933	211,550	192,129	174,491	158,472	143,924	130,712
21	Сер. значення	в'язкості	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403	5,403
22	Відхилення	в'язкості	1,00418743	1,04065	1,00261	0,94625	1,0419	0,95601	1,01054	0,9736	1,02097	1,01175	0,92835	1,0733
23	Статистична обробка даних													
24	a	K	Ln K	n	m	k	S ²	S ² зал.	α	v1	v2	Fp	Ft	
25	-0,0096	6333,4403	8,75359886	12	2	1	0,12239	0,00203	0,05	11	10	60,2987	0,99999	
26	Перевірка адекватності рівняння - рівняння адекватно описує результати експерименту													

Рисунок 5.9 – Лист математична обробка файлу geoviskozimetr_Geplera.xls

5.5 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на модифікованих вагах Каргіна-Соголової та еластопластометрі

Толстого

Для автоматизації розрахунків реологічних характеристик використовуються файли *vesi_Kargina.xls*, *elastoplastometr.xls*. Дані файли містять наступні листи:

- введення даних;
- модуль пружності;
- високоеластичний модуль;

- пластична в'язкість;
- в'язкість пружної післядії.

Відмінність даних файлів тільки в таблицях введення параметрів зразків (рис. 5.10, 5.11) та позначенні основних реологічних характеристик. Файли розроблено для автоматизації розрахунку основних реологічних показників для 6 зразків (195 експериментальних точок для кожного).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Дослідження структурно-механічн						
2	Введіть назву зразку	1	2	3	4	5	6
3	Маса навантаження, кг						
4	Висота зразку, м						
5	Ціна поділки шкали, м						
6	Задати множник	1,0E+03					
7	Діаметр зразку D1, м						
8	Діаметр зразку D2, м						
9	Діаметр зразку Dср., м	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!	#ДЕЛ/0!

Рисунок 5.10 – Лист введення даних файлу *vesi_Kargina.xls*

	A	B	C	D	E	F	G
1	Дослідження структурно-механічних властивост						
2	Введіть назву зразку	1	2	3	4	5	6
3	Маса навантаження, кг	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
4	Висота зразку, м	0,0105	0,0105	0,009	0,009	0,0105	0,0105
5	Ціна поділки шкали, м	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
6	Задати множник	1,0E+03					
7							

Рисунок 5.11 – Лист введення даних файлу *elastoplastometr.xls*

Введення вихідних даних для зразків, що досліджуються на модифікованих вагах Каргіна-Соголової (рис. 5.10):

- ввести назву зразка, виражену числом від 0 до 10^{37} ;
- ввести масу навантаження (в кг), що діє на зразок;
- ввести ціну поділки шкали окуляра мікроскопу (в м);
- в поле B6 ввести множник 10^3 (для наочності відображення графіків за умовчанням) або інший, наприклад 10^2 , але необхідно змінити значення в полях L4, N4, P4, R4, T4, V4, W4:AB4 (рис.5.12); та в полях AD4:AD6 (рис.5.14). Тобто ми збільшили реальні значення в 1000 або 100 раз
- ввести одне-два значення діаметра зразка (в м);
- після введення діаметра автоматично визначається середньоарифметичне значення діаметра;

Порядок введення експериментальних даних:

- значення часу ввести в стовпець J, значення деформації, що фіксується за допомогою окуляра, ввести у поля жовтого кольору стовпців K, M, O, Q, S, U (рис. 5.12). У стовпцях праворуч від жовтих полів розраховується значення відносної деформації за формулою (4.16). Необхідно пам'ятати, що кількість точок в усіх зразках повинна бути однаковою, зайвих значень часу при якому не фіксувалась деформація не вводять (це негативно впливає на відображення графіків);

	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	
1	тивостей намодифікованих вагах Каргіна-Сологової																			
2																				
3		1		2		3		4		5		6		Апроксимовані значення						
4	Час, хв	покази	$\times 10^{-3}$	1	2	3	4	5	6											
5	0																			
6	1																			
7	2																			
8	3																			
9	4																			
10	5																			
11	6																			
12	7																			
13	8																			
14	9																			
15	10																			
16	15																			
17	20																			
18	25																			
19	30																			
20	40																			

Рисунок 5.12 – Лист введення даних файлу `vesi_Kargina.xls`

- за результатами експериментальних даних для кожного зразка автоматично будується два графіка: один – у вигляді маркерів (результати експерименту), другий – у вигляді апроксимації за результатами математичної обробки, дані яких розміщені в стовпцях W:AB. Дані початкової та кінцевої ділянки залежності апроксимуються рівнянням регресії вигляду (5.1). Для цього з масиву автоматично вибирається по 5 (перші та останні) експериментальних даних, які заносяться до таблиць (рис. 5.13). Знаходження коефіцієнтів k і b в рівнянні регресії здійснюється за формулами (5.4, 5.5). Достовірність апроксимації показує коефіцієнт детермінації R^2 . Якщо для кінцевої ділянки кривої він становить $0,98 \dots 1,0$ дослід можна припинити, тобто таким чином визначається час, який необхідний для даного напруження, щоб розвилась пластична деформація в дослідному зразку. Цей час можна встановити за зразком, який на думку дослідника має найменшу здатність до деформації. Всі інші зразки, об'єднані однією ознакою, витримують під однаковим напруженням однаковий час.

	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW
1	Для кінцевої ділянки кривої												
2		1	2	3	4	5	6						
3													
4		50	296,19	50	229,52	50	200,00	50	162,22	50	296,19	50	296,19
5		60	310,48	60	243,81	60	213,89	60	174,44	60	310,48	60	310,48
6		70	324,76	70	256,19	70	225,00	70	183,33	70	324,76	70	324,76
7		80	339,05	80	268,57	80	238,89	80	188,89	80	339,05	80	339,05
8		90	353,33	90	280,95	90	250,00	90	197,78	90	353,33	90	353,33
9	k, b	1,43	224,76	1,28	166,48	1,25	138,06	0,86	121,44	1,43	224,76	1,43	224,76
10		0,00	0,00	0,02	1,57	0,03	1,98	0,06	4,56	0,00	0,00	0,00	0,00
11	R ²	1,000	0,000	0,999	0,696	0,999	0,878	0,984	2,018	1,000	0,000	1,000	0,000
12													
13													
14	Для початкової ділянки кривої												
15		1	2	3	4	5	6						
16													
17		0	7,62	0	6,67	0	6,11	0	3,33	0	7,62	0	7,62
18		1	30,48	1	24,76	1	26,67	1	14,44	1	30,48	1	30,48
19		2	47,62	2	40,00	2	34,44	2	18,89	2	47,62	2	47,62
20		3	62,86	3	54,76	3	41,67	3	25,56	3	62,86	3	62,86
21		4	75,24	4	62,86	4	50,00	4	30,00	4	75,24	4	75,24
22	k, b	16,76	11,24	14,24	9,33	10,28	11,22	6,44	5,56	16,76	11,24	16,76	11,24
23		1,13	2,77	1,04	2,55	1,48	3,62	0,67	1,63	1,13	2,77	1,13	2,77
24	R ²	0,986	3,580	0,984	3,289	0,942	4,673	0,969	2,108	0,986	3,580	0,986	3,580
25													

Рисунок 5.13 – Таблиці для апроксимації даних файлу *vesi_Kargina.xls*

Визначення основних реологічних характеристик:

- розрахунок основних реологічних характеристик здійснюється автоматично за обробленими експериментальними даними за формулами (4.17 – 4.22) та заносяться у таблицю AC2:AJ13 на листі введення даних (рис. 5.14);
- для побудови графічних залежностей основних реологічних характеристик дані з таблиці AC2:AJ13 автоматично заносяться на однойменні реологічним характеристикам листи в таблиці A8:G9. Якщо даних в таблиці менше 6, необхідно очистити незаповнені поля від формул. У поле A8 ввести назву параметру, що досліджується;
- для наочності побудови графіків використовується множник – поле C7. Наприклад, якщо значення пластичної в'язкості знаходяться в інтервалі $2,0 \dots 5,7 \times 10^7$ можна ввести в поле C7 множник 10^{-7} . Даний множник зі зворотним знаком необхідно ввести на діаграму на вісь ординат, а також ввести назву осі абсцис (рис. 5.15);
- на діаграмі у вигляді маркерів автоматично будується один графік (результати експерименту), другий – за результатами математичної обробки, яка здійснюється на кожному з листів (алгоритм математичної та статистичної обробки та вибір рівняння регресії наведено в розділі 5.2) - необхідно ввести вручну;
- відредагувати діаграму.

	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ
2	Позначення	Найменування показника	1	2	3	4	5	6
4	$\epsilon_{зв.}$	Зворотна деформація, 10^{-3}	224,76	166,48	138,06	121,44	224,76	224,76
5	$\epsilon_{жст.}$	Незворотна деформація, 10^{-3}	128,57	114,86	112,50	77,00	128,57	128,57
6	$\epsilon_{заг.}$	Загальна деформація, 10^{-3}	353,33	281,33	250,56	198,44	353,33	353,33
7	σ	Напруження зсуву, Па	32,70	32,70	32,70	32,70	32,70	32,70
8	I	Податливість, Па^{-1}	1,08E-02	8,60E-03	7,66E-03	6,07E-03	1,08E-02	1,08E-02
9	$E_{жр.}$	Умовно миттєвий модуль пружності, Па	2909,75	3503,57	2913,86	5886,00	2909,75	2909,75
10	$E_{ел.}$	Вискоеластичний модуль (Па)	153,14	208,09	257,82	282,17	153,14	153,14
11	η^*_{0}	Пластична в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$	1,37E+06	1,54E+06	1,57E+06	2,29E+06	1,37E+06	1,37E+06
12	K	Відношення деформ звор. до заг.	0,64	0,59	0,55	0,61	0,64	0,64
13	$\eta_{жр}$	В'язкість пружної післядії, $\text{Па}\cdot\text{с}$	117051,14	137799,33	190897,30	304448,28	117051,14	117051,14

Рисунок 5.14 – Зведена таблиця основних реологічних характеристик

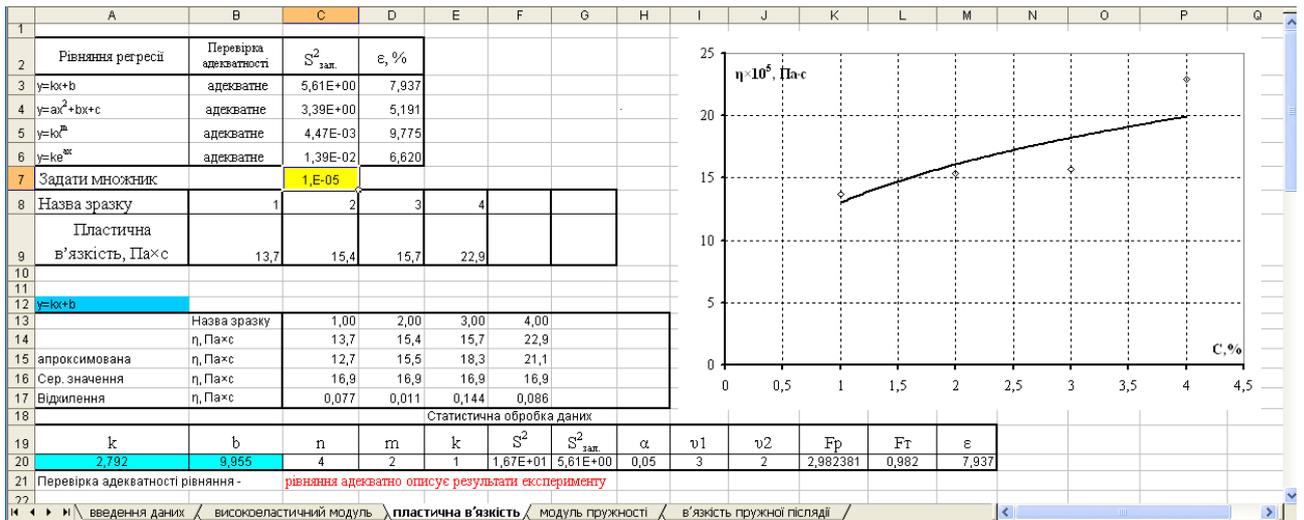


Рисунок 5.15 – Обробка експериментальних даних з пластичної в'язкості

Введення вихідних даних для зразків, що досліджуються на еластопластометрі Толстого (рис. 5.16):

- ввести назву зразку, виражену числом від 0 до 10^{37} ;
- ввести масу навантаження (в кг), що діє через блок на верхню пластину;
- ввести висоту зразка, що розміщений між пластинами (в м). Увага: висота зразків, реологічні характеристики яких будуть порівнюватись, повинна бути однаковою;
- ввести ціну поділки шкали окуляра мікроскопу (в м);
- для наочності відображення графіків у поле B6 ввести множник. За умовчанням – множник 10^3 , але можна ввести інший, наприклад 10^2 , але необхідно змінити значення в полях L4, N4, P4, R4, T4, V4, W4:AB4 (рис. 5.15) та в полях AD4:AD6;
- основні реологічні характеристики розраховуються за формулами (4.8 – 4.15);
- інші правила роботи аналогічні правилам роботи з файлом `vesi_Kargina.xls`.

	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	
1	стопластометрі Толстого																			
2													Апроксимовані значення							
3	1		2		3		4		5		6		1	2	3	4	5	6		
4	Час, хв	покази	$\gamma \times 10^{-3}$																	
5	0	0,16	7,62	0,14	6,67	0,11	6,11	0,06	3,33	0,16	7,62	0,16	7,62	11,24	9,33	11,22	5,56	11,24	11,24	
6	1	0,64	30,48	0,52	24,76	0,48	26,67	0,26	14,44	0,64	30,48	0,64	30,48	28,00	23,57	21,50	12,00	28,00	28,00	
7	2	1	47,62	0,84	40,00	0,62	34,44	0,34	18,89	1	47,62	1	47,62	44,76	37,81	31,78	18,44	44,76	44,76	
8	3	1,32	62,86	1,15	54,76	0,75	41,67	0,46	25,56	1,32	62,86	1,32	62,86	61,52	52,05	42,06	24,89	61,52	61,52	
9	4	1,58	75,24	1,32	62,86	0,9	50,00	0,54	30,00	1,58	75,24	1,58	75,24	78,29	66,29	52,33	31,33	78,29	78,29	
10	5	1,76	83,81	1,48	70,48	1,02	56,67	0,68	37,78	1,76	83,81	1,76	83,81	83,81	70,48	56,67	37,78	83,81	83,81	
11	6	1,92	91,43	1,62	77,14	1,1	61,11	0,75	41,67	1,92	91,43	1,92	91,43	91,43	77,14	61,11	41,67	91,43	91,43	
12	7	2,1	100,00	1,85	88,10	1,2	66,67	0,84	46,67	2,1	100,00	2,1	100,00	100,00	88,10	66,67	46,67	100,00	100,00	
13	8	2,28	108,57	1,98	94,29	1,3	72,22	0,94	52,22	2,28	108,57	2,28	108,57	108,57	94,29	72,22	52,22	108,57	108,57	
14	9	2,42	115,24	2,26	107,62	1,4	77,78	1,02	56,67	2,42	115,24	2,42	115,24	115,24	107,62	77,78	56,67	115,24	115,24	
15	10	2,6	123,81	2,42	115,24	1,5	83,33	1,12	62,22	2,6	123,81	2,6	123,81	123,81	115,24	83,33	62,22	123,81	123,81	
16	15	3,5	166,67	2,68	127,62	1,9	105,56	1,42	78,89	3,5	166,67	3,5	166,67	166,67	127,62	105,56	78,89	166,67	166,67	
17	20	4,2	200,00	3,24	154,29	2,3	127,78	1,82	101,11	4,2	200,00	4,2	200,00	200,00	154,29	127,78	101,11	200,00	200,00	
18	25	4,74	225,71	3,65	173,81	2,5	138,89	1,98	110,00	4,74	225,71	4,74	225,71	225,71	173,81	138,89	110,00	225,71	225,71	
19	30	5,28	251,43	3,92	186,67	2,8	155,56	2,2	122,22	5,28	251,43	5,28	251,43	251,43	186,67	155,56	122,22	251,43	251,43	
20	40	5,84	278,10	4,42	210,48	3,14	174,44	2,64	146,67	5,84	278,10	5,84	278,10	278,10	210,48	174,44	146,67	278,10	278,10	

Рисунок 5.16 – Лист введення даних файлу *elastoplastometr.xls*

5.6 Автоматизована обробка експериментальних даних, отриманих на пенетрометрі “Labor”

Для автоматизації розрахунків граничної напруги зсуву використовується файл *penetrometr.xls*. Файл містить наступні листи:

- введення даних;
- шість листів для математичної обробки даних;
- вихідні дані.

Файл розрахований на шість графічних залежностей (12 експериментальних точок для кожної). Для кожної графічної залежності розроблено блок введення даних та листи математичної і статистичної обробки даних.

Порядок введення даних:

- на листі **введення даних** (рис. 5.17) у поля синього кольору ввести назву параметра, що досліджується (це може бути назва харчової добавки, температура зберігання та ін.), тобто формат назви довільний;
- у поля жовтого кольору ввести назву зразка (числовий формат) – це може бути концентрація речовини, значення температури, час та ін.;
- ввести кут індентора, що використовується для дослідження систем;
- ввести масу індентора (в кг);
- ввести значення глибини занурення індетора (в в.о.). Як правило, проводять три вимірювання, значення знімають по шкалі пенетрометра екрану спостереження в в.о.;
- після введення глибини занурення автоматично в незабарвлених полях розраховується середньоарифметичне значення в м;
- автоматично з листа **вихідні дані** виводиться значення константи конусу індентора на основі введеного значення кута індентора;
- гранична напруга зсуву розраховується автоматично за формулою (4.23), результати розрахунку виводяться на діаграмі на листі **введення даних**;

- Лист 1...6 призначені для математичної обробки експериментальних даних. Номер листа відповідає порядку блоку введення даних на листі введення даних. Апроксимація експериментальних даних здійснюється автоматично (алгоритм розрахунку – див. розділ 5.2).

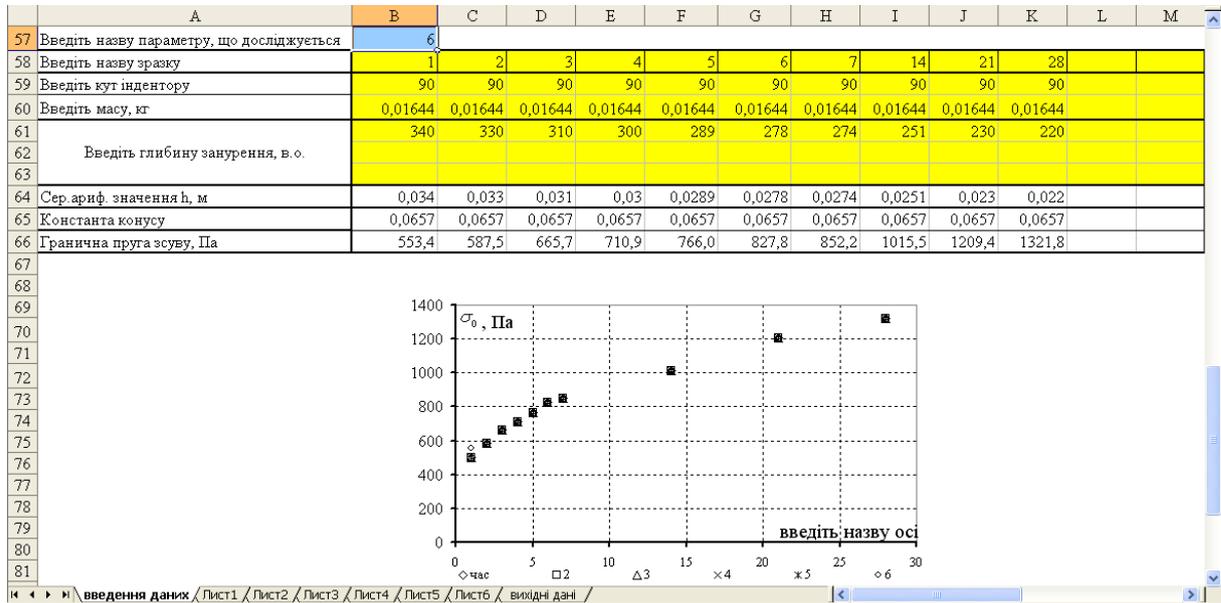


Рисунок 5.17 – Лист введення даних файлу penetrometr.xls

Для описання результатів експериментальних даних рівнянням регресії необхідно:

- ввести в поле A9 на листах Лист 1...6, назву аргументу (наприклад, концентрація, %);
- проаналізувати дані таблиці, що розміщена в полях A3:D7 та вибрати необхідне рівняння регресії;
- додати графік у вигляді лінії без маркерів на діаграму на листі введення даних. Значення, за якими необхідно побудувати графік, розраховуються за рівнянням регресії в рядка апроксимована (рис. 5.23), аргумент функції можна ввести з рядку 9 листів 1...6;
- ввести назву осі на діаграмі та відредагувати останню.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
2	Назва параметру, що досліджується			час												
3	Рівняння регресії	Перевірка адекватності	S ² зл.	ε, %												
4	y=kx+b	адекватне	4,10E+03	6,232												
5	y=ax ² +bx+c	адекватне	1,43E+03	2,556												
6	y=kx ^m	адекватне	9,93E-05	1,771												
7	y=ke ^{ax}	адекватне	1,41E-02	8,586												
8																
9	Назва зразку	1	2	3	4	5	6	7	14	21	28					
10	ГНЗ Па	499,2	587,5	665,7	710,9	766,0	827,8	852,2	1015,5	1209,4	1321,8					
11																
12																
13	y=kx+b															
14	Назва зразку	1,00	2,00	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	14,00	21,00	28,00					
15	ГНЗ Па	499,2	587,5	665,7	710,9	766,0	827,8	852,2	1015,5	1209,4	1321,8					
16	апроксимована	ГНЗ Па	614,0	642,6	671,2	699,8	728,4	757,0	785,6	985,7	1185,8	1385,9				
17	Сер. значення	ГНЗ Па	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6				
18	Відхилення	ГНЗ Па	0,187	0,086	0,008	0,016	0,052	0,094	0,085	0,030	0,020	0,046				
19	Статистична обробка даних															
20	k	b	n	m	k	S ²	S ² зл.	α	ν1	ν2	Fp	Ft	ε			
21	28,590	585,434	10	2	1	7,02E+04	4,10E+03	0,05	9	8	17,12121	1,000	6,232			
22	Перевірка адекватності рівняння рівняння адекватно описує результати експерименту															
23																
24																
25	y=ax ² +bx+c															
26	Назва зразку	1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	14,000	21,000	28,000					
27	ГНЗ Па	499,2	587,5	665,7	710,9	766,0	827,8	852,2	1015,5	1209,4	1321,8					
28	X2	1	4	9	16	25	36	49	196	441	784					
29	X3	1	8	27	64	125	216	343	2744	9261	21952					
30	X4	1	16	81	256	625	1296	2401	38416	194481	614656					
31	апроксимована	ГНЗ Па	554,5	603,8	651,5	697,5	741,8	784,5	825,6	1066,4	1226,0	1304,5				
32	Сер. значення	ГНЗ Па	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6	845,6				
33	Відхилення	ГНЗ Па	0,100	0,027	0,022	0,019	0,033	0,055	0,032	0,048	0,014	0,013				
34																
35		1561	91	10		8456,0029	91	10		1561	8456,003	10		1561	91	8456,00292
36	Δa=	34741	1561	91		97902,993	1561	91		Δb=	34741	97902,99	91	Δc=	34741	1561
37		852229	34741	1561		1879632,9	34741	1561			852229	1879633	1561		852229	34741
38	Статистична обробка даних															

Рисунок 5.18 – Лист Лист1 файлу penetrometr.xls

Чітко дотримуючись вказаних правил роботи, можна за короткий проміжок часу обробити значну кількість експериментальних даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Виноградов Г.В. Малкин А.Я. Реология полимеров. М.: Химия, 1977. – 438 с.
2. Гончаров А. Excel 7.0 в примерах. – СПб.: Питер, 1996. – 256 с.
3. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 383 с.
4. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 200 с.
5. Иванова-Чумакова Л.В., Ребиндер П.А., Крус Г.И. Особенности деформационного поведения студней желатины//Коллоидный журнал. – 1956. – Т. 18. – С. 682-690.
6. Измайлова З.Н., Ребиндер П.А. Структурообразование в белковых системах. – М.: Наука, 1974. – 268 с.
7. Маслов Г.В., Маслова А.М. Реология рыбы и рыбных продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
8. Матц С.А. Структура и консистенция пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1972. – С. 237.
9. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
10. Методы исследования молока и молочных продуктов /Под общ. редакцией А.М. Шалыгиной. – М.: Колос, 2000. – 368 с.
11. Михайлов Н.В., Ребиндер П.А. О структурно-механических свойствах дисперсных и высокомолекулярных систем//Коллоидный журнал. – 1955. – Т. 17. – С. 107-119.
12. Мур Джеффри, Уэдерфорд Ларри. Экономическое моделирование в Microsoft Excel/ 6-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1024 с.
13. Николаев Б.А. Измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов. – М.: Экономика, 1964. – 223 с.
14. Пирогов А.Н., Доня Д.В. Исследование инвариантности метода внедрения конуса при определении предельного напряжения сдвига//Хранение и переработка сельхозсырья. – 2002. – №10. – С.17-19
15. Ребиндер П.А. Новые методы характеристик упруго-пластических свойств структурированных дисперсных систем и растворов//Новые методы физико-химических исследований поверхностных явлений. – М.: Изд-во АН СССР, 1950. – 188 с.
16. Рейнер М. Деформация и течение. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 318 с.
17. Рейнер М. Реология. – М.: Наука, 1965. – 223 с.
18. Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник/Под ред. Мачихина. – М.: Агропромиздат. – 1990, 271 с.
19. Сафронова Т.М. Органолептическая оценка рыбной продукции: Справочник. – М.: Агропромиздат, 1985. – 216 с.

20. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов /А. В. Горбатов, А. М. Маслов, Ю. А. Мачихин и др.: Под ред. А. В. Горбатова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.
21. Терминология и методы оценки структурно-механических свойств рыбы и рыбных продуктов. Методическое руководство. – Л.: Гипрорыбфлот, 1978. – 66 с.
22. Топольник В.Г., Ратушний О.С. Математико-статистична обробка результатів досліджень кулінарної продукції: Учбов. посібник. - Донецьк: ДДКІ, 1997. – 167 с.
23. Урьев Н.Б., Талейсник М.А. Пищевые дисперсные системы (физико-химические основы интенсификации технологических процессов) М.: Агропромиздат, 1985. – 296 с.
24. Niina Kälviäinen. Texture modifications in semisolid and solid foods: sensor characterization and acceptance in different age groups: Academic Dissertation /Agriculture and Forestry, University. – Helsinki. – 2002. – 74 p.
25. Ray Marsilli. Texture and Mouthfeel: Making Rheology Real//Weeks Publishing Company. – 1993. – P. 4.
26. Sherman P. Industrial Rheology. – London, New-Jork: Academic Press, 1970. – 423 p.
27. Szczesniak A.S. An overview of recent advances in food texture research//Food Technology. – 1977. – Vol. 31, № 4. – P. 71.

Навчальне видання

ГОРАЛЬЧУК Андрій Богданович
ПІВОВАРОВ Павло Петрович
ГРИНЧЕНКО Ольга Олексіївна
ПОГОЖИХ Микола Іванович
ПОЛЕВИЧ Віталій Вадимович
ГУРСЬКИЙ Петро Васильович

РЕОЛОГІЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СИРОВИНИ І ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Навчальний посібник

Редактор: Жидкова О.М.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції серія ДК
№2319 від 19.10.2005 р.

Підп. до друку 27.11.2006 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсет. Друк. офс.
Обл.-вид. арк. 3,5 Умов. друк. арк.. 4,0. Умов. фарб.-відб. 4,0 Тираж 150
прим. Зам. №

Харківський державний університет харчування та торгівлі
61051. Харків, вул. Клочківська, 333.
ДОД ХДУХТ. 61051. Харків, вул. Клочківська, 333