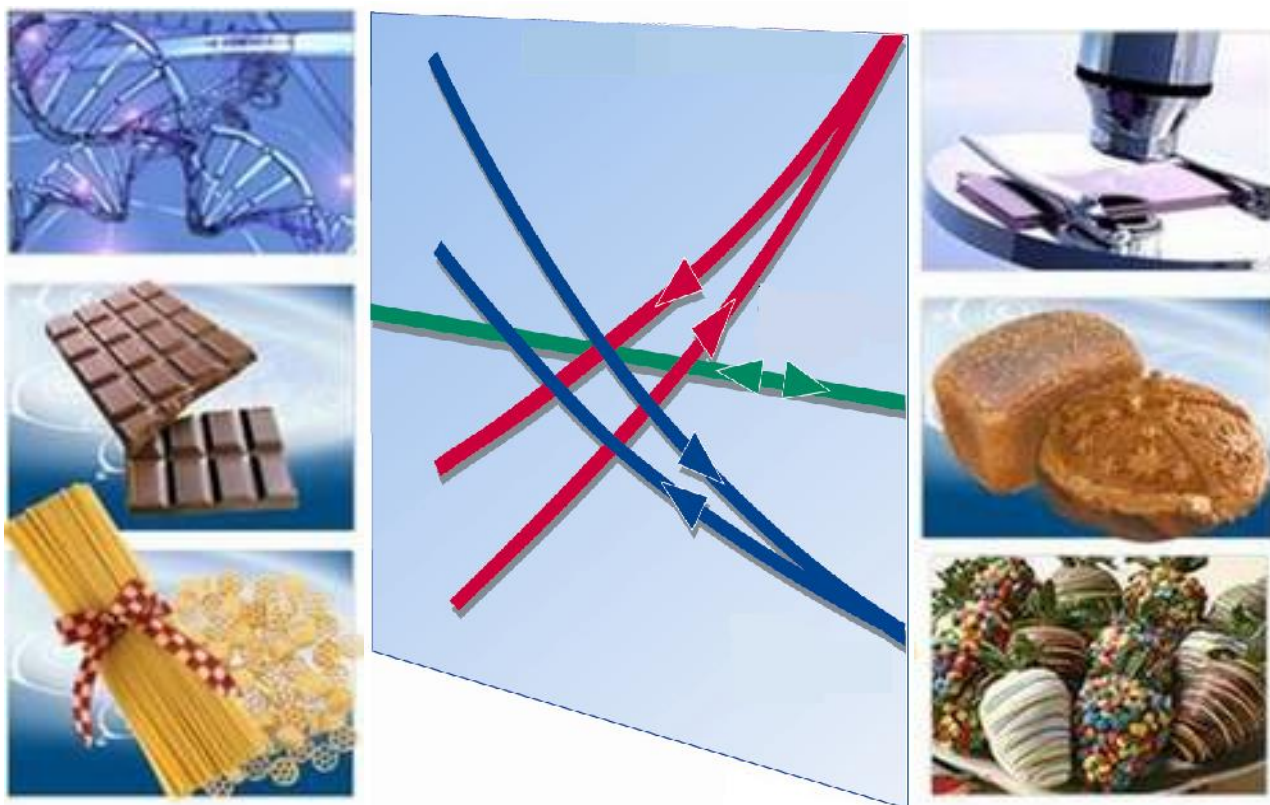


Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет

В.І. Генчева, Н.П. Лашко, О.А. Бражко

## РЕОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ ТА ПРОДУКТІВ

Навчальний посібник  
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра  
спеціальності «Хімія»  
освітньо-професійної програми «Хімія»



Запоріжжя  
2019

**Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний університет**

**В.І. Генчева, Н.П. Лашко, О.А. Бражко**

## **РЕОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ ТА ПРОДУКТІВ**

Навчальний посібник  
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра  
спеціальності «Хімія»  
освітньо-професійної програми «Хімія»

Затверджено  
вченою радою ЗНУ  
Протокол №8 від 26.04.2019 р.

**Запоріжжя  
2019**

УДК:641.1:543.318(075.8)  
Г348

Генчева В.І., Лашко Н.П., Бражко О.А. Реологія харчової сировини та продуктів : навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Хімія» освітньо-професійної програми «Хімія». Запоріжжя : Запорізький національний університет, 2019. 74 с.

У виданні відповідно до робочої програми послідовно у восьми темах висвітлено теоретичні основи дисципліни «Реологія харчової сировини та продуктів». Навчальний матеріал наочно проілюстровано достатньою кількістю рисунків, графіків і схем та доповнено практичними завданнями, виконання яких сприятиме набуттю необхідних умінь і навичок.

Для діагностики рівня засвоєння знань запропоновано контрольні питання й тести. Рекомендовано основну та додаткову літературу для опрацювання.

Посібник адресується здобувачам ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Хімія», які навчаються за освітньо-професійною програмою «Хімія».

Рецензент

*І.Б. Лабенська*, канд. біол. наук, доцент кафедри хімії

Відповідальний за випуск

*О.А. Бражко*, д-р біол. наук, проф., завідувач кафедри хімії

## ЗМІСТ

<b>Передмова</b> .....	4
<b>Тема 1</b> ВСТУП ДО РЕОЛОГІЇ.....	6
<b>Тема 2</b> ДИСПЕРСНІ СИСТЕМИ В РЕОЛОГІЇ.....	15
<b>Тема 3</b> РЕОЛОГІЧНІ РІВНЯННЯ ТА РЕОЛОГІЧНІ ТІЛА .....	24
<b>Тема 4</b> МЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ В РЕОЛОГІЇ.....	30
<b>Тема 5</b> ЗМІНИ РЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ.....	35
<b>Тема 6</b> МЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ РЕОЛОГІЧНИХ ТІЛ.....	44
<b>Тема 7</b> РЕОЛОГІЧНІ РІВНЯННЯ ТЕЧІЇ.....	49
<b>Тема 8</b> ПОВЗУЧИСТЬ ХАРЧОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ДІЄЮ ОСЬОВОГО СТИСНЕННЯ.....	61
<b>Тема 9</b> ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХАРЧОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....	66
<b>Рекомендована література</b> .....	72
<b>Використана література</b> .....	73

## ПЕРЕДМОВА

**Реологія** (грец. *rheos* – течія, потік + *logos* – слово, вчення) – розділ механіки, що вивчає закономірності деформації та плинність матеріальних систем під дією зовнішніх навантажень.

У колоїдній хімії методи реології застосовують для дослідження структурно-механічних властивостей дисперсних систем із рідким і твердим дисперсійним середовищем, яким притаманні певні механічні властивості, пов'язані з їх структурою (в'язкість, пластичність, пружність, міцність).

Харчові галузі виробляють величезну кількість продуктів від елементарних за складом (наприклад, кухонна сіль або мінеральна вода) до найскладніших за біологічною будовою (наприклад, м'яси та рибні продукти). Те саме стосується і сировини. Різноманітність сировини, необхідність її спрямованої обробки, що в деяких випадках супроводжується якісною зміною її властивостей, потребують застосування різноманітних операцій, форм впливу тощо. З огляду на це, актуальними для харчової промисловості є проблеми створення, освоєння та впровадження прогресивних технологічних процесів із застосуванням фізичних методів обробки: створення нових видів обладнання для підвищення ефективності виробництва; розробка об'єктивних наукових методів оцінки якості сировини та продуктів тощо. При цьому важливе значення мають реологічні методи як науковий фундамент для практичних і теоретичних розробок.

Завданням реології є дослідження й обґрунтування необхідності поєднання різних видів впливу для забезпечення заданого рівня реологічних характеристик упродовж усього технологічного процесу.

*Мета вивчення* студентами курсу «Реологія харчової сировини та продуктів», який є вибіркоvim і належить до циклу дисциплін професійної підготовки, – набуття уявлення про основні реологічні властивості харчової сировини та продуктів, засвоєння основних понять реології та усвідомлення їх сутності, ознайомлення з прикладними аспектами вимірювання реологічних параметрів у системі фізико-хімічного контролю технологічних процесів виробництва продуктів харчування.

*Ключовими завданнями* вивчення навчальної дисципліни «Реологія харчової сировини та продуктів» є ознайомлення з теоретичними основами реології; основними закономірностями реологічної класифікації харчової сировини та продуктів; засвоєння методів визначення реологічних параметрів продуктів харчової промисловості.

У результаті вивчення курсу «Реологія харчової сировини та продуктів» студент повинен

*Знати:*

- основні терміни та поняття реології;
- основні закономірності реологічної класифікації харчової сировини та продуктів;

- методи визначення реологічних параметрів продуктів харчової промисловості;
- значення структурно-механічних характеристик харчових продуктів;
- теоретичні передумови практичного застосування принципів фізико-хімічної механіки для управління якістю харчових продуктів.

*Уміти:*

- пояснювати явища, закономірності та процеси в реології;
- обирати оптимальні реологічні показники харчових продуктів з точки зору їх практичного використання для контролю якості сировини й готової продукції харчового виробництва;
- застосовувати методи реометрії для управління якістю при виробництві харчових продуктів;
- застосовувати набуті вміння та навички для вирішення практичних завдань техно-хімічного контролю процесів виробництва продуктів харчової промисловості.

У результаті вивчення дисципліни студент повинен засвоїти понятійно-категоріальний апарат реології, систему знань про деформацію, види деформації, зсув, простий зсув, напруження, гідростатичний тиск, напруження зсуву, пружність, пластичність, в'язкість, міцність, твердість, м'якість, крихкість, когезію, адгезію, коагуляційні структури, конденсаційно-кристалізаційні структури, криві течії або деформування (реограми), дисперсійне середовище, дисперсну фазу, золі, гелі, тиксотропію, адсорбційну вологу, осмотичну вологу, вільну вологу, зв'язану вологу та ін.

Базовими для успішного опанування програмного матеріалу курсу «Реологія харчової сировини та продуктів» є знання, засвоєні студентами під час вивчення таких дисциплін, як «Техніка експерименту», «Фізика», «Квантова хімія».

Своєю чергою «Реологія харчової сировини та продуктів» є основою для вивчення низки професійно-орієнтованих дисциплін, як-от: «Фізика і хімія молока та м'ясо-молочних продуктів», «Великий практикум з хімії харчових продуктів» та проходження виробничої практики з хімії харчових продуктів.

Запропонований авторами навчальний посібник сприятиме засвоєнню теоретичних основ навчальної дисципліни «Реологія харчової сировини та продуктів» та набуттю необхідних умінь і навичок.


# Тема 1

## ВСТУП ДО РЕОЛОГІЇ

**Мета:** з'ясування сутності реології та її видів; засвоєння основних понять реології; ознайомлення з фізико-механічними властивостями харчових матеріалів.

### План

- 1.1. Поняття реології. Її сутність і види.
- 1.2. Фізико-механічні властивості харчових матеріалів.

 **Ключові терміни та поняття:** реологія, теоретична реологія, експериментальна реологія, макрореологія (феноменологічна реологія), мікрореологія, біореологія, предмет реології, деформація, оборотна деформація, необоротна деформація, зсув, простий зсув, напруження, гідростатичний тиск, напруження зсуву, пружне відновлення, пружність, пластичність, в'язкість, міцність, твердість, м'якість, крихкість, когезія, адгезія, липкість, зовнішнє тертя.

### 1.1. Поняття реології. Її сутність і види

**Реологія** – це наука про деформацію та течію різних тіл.

Термін «реологія» ввів американський учений Ю. Бінгам під час проведення реологічних досліджень рідин і дисперсних систем. Офіційно він був прийнятий на 3-му симпозіумі із пластичності в 1929 р. (США).

Реологія розглядає процеси, пов'язані з необоротними залишковими деформаціями й течією різноманітних в'язких і пластичних матеріалів, явища релаксації напруження та ін.

Виокремлюють такі види реології:

1) **теоретична реологія** – реологія, що займає проміжне положення між гідромеханікою та теоріями пружності, пластичності, повзучості. Теоретична реологія встановлює залежності між напруженням, зумовленим деформаціями, та їх змінами в часі. Основна увага звертається на складну реологічну поведінку речовини, коли з'являються, наприклад, в'язкі та пружні властивості або в'язкі та пластичні властивості;

2) **експериментальна реологія** – реологія, що займається визначенням реологічних властивостей за допомогою спеціальних приладів і випробувальних машин;

3) **макрореологія** (або **феноменологічна реологія**) – реологія, що розглядає всі матеріали в тому вигляді, в якому вони постають перед спостерігачем при поверхневому огляді неозброєним оком, тобто як однорідні й позбавлені структури (чисті рідини та досконалі мікрокристали);

4) **мікрореологія** – реологія, що досліджує деформацію та течію в мікрооб'ємах, співмірних із розмірами частинок дисперсної фази в дисперсних системах (дво- і багатофазних системах) залежно від реологічних властивостей їх компонентів;

5) **біореологія** – реологія, що досліджує течію різноманітних біологічних рідин, деформації різних тканин у людини та тварин.

**Предметом реології** є дослідження різних видів деформації залежно від напружень, які їх супроводжують.

**Деформація** – відносний зсув частинок матеріального тіла, при якому не порушується безперервність самого тіла.

Якщо під дією кінцевих сил деформація тіла збільшується в часі безупинно й необоротно, то це означає, що матеріал тече. При деформації відбувається зміна форми або розмірів тіла. Є випадки, коли явища не виявлені, наприклад, при ламінарному потоці в зазорі ротаційного віскозиметра.

Величина та характер деформації залежать від властивостей матеріалу тіла, його форми та способу застосування зовнішніх сил.

Деформація супроводжується виникненням внутрішніх сил взаємодії між частинками тіла.

Деформація поділяється на два загальні види:

- **оборотну (пружну)**, яка зникає після припинення дії сили;
- **необоротну (в'язку та пластичну)**, яка не зникає після зняття навантаження; при цій деформації частина механічної енергії переходить у тепло.

Окрім того, розрізняють **миттєву й запізнїлу пружну деформацію**.

Швидкість поширення миттєвої пружної деформації надзвичайно висока (приймається рівною швидкості звуку в даному середовищі). Час утворення деформації без великої помилки приймається рівним нулю.

Миттєва пружна деформація описується законом Гука.

Запізнїла пружна деформація протікає в часі, причому швидкість зростання цієї деформації при постійному напруженні монотонно убуває. Після зняття навантаження ця деформація зникає також з монотонно спадною швидкістю. Це явище називається **пружним відновленням**.

**Необоротна деформація** – це в'язка та пластична течія матеріалу.

При в'язкій течії деформація пропорційна напруженню за законом Ньютона й після зняття навантаження не відновлюється.

Пластична деформація виникає при напруженні, що перевищує деяку граничну величину (межа плинності), до досягнення якої матеріал поводитьсь як пружний.

**Зсув** – вид деформації в реології.

**Простий зсув** – плоска деформація, паралельна нерухомій площині внаслідок дії на гранях елементарного паралелепіпеда дотичних напружень; особливий випадок ламінарного зміщення, при якому можна вважати, що тіло складається з великої кількості тонких шарів, що не деформуються, а тільки ковзають один за одним.

Види ламінарного зміщення зображені на рисунку 1.



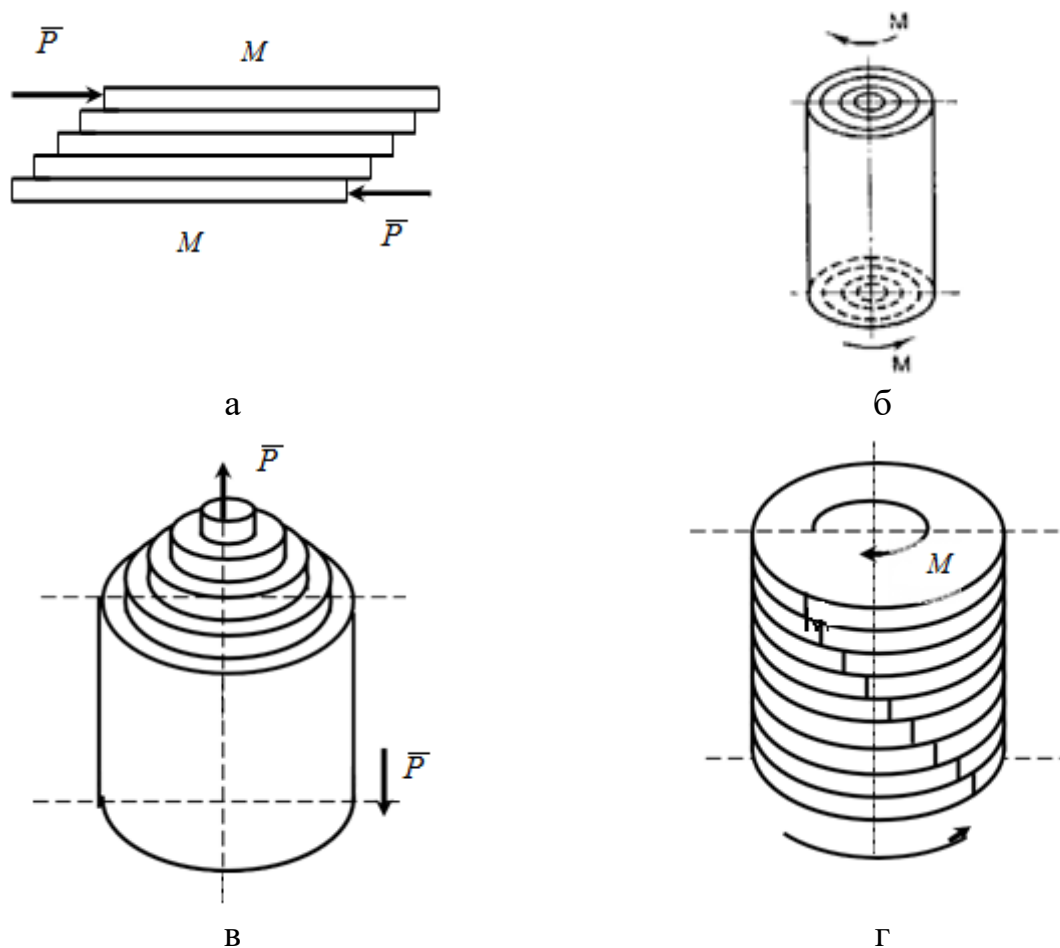


Рисунок 1 – Види ламінарного зміщення: а – простий зсув; б – обертальний рух; в – поступальний (телескопічний) рух; г – крутіння

**Напруження** – ступінь інтенсивності внутрішніх сил пружності.

Розрізняють **повне, нормальне й дотичне напруження**. Повне напруження поділяють на нормальне й дотичне напруження.

**Гідростатичний тиск** – напружений стан, при якому нормальні напруження на гранях елемента рівні між собою, а дотичні відсутні, внаслідок чого об'єм зменшується (або збільшується), але форма не змінюється.

**Напруження зсуву** – сила, що спрямована викликати деформацію речовини шляхом зсуву вздовж площини, паралельної докладанню зусиль.

Наприклад, якщо при всебічному рівномірному тиску змінюється тільки об'єм тіла, а форма залишається незмінною, тоді при зсуві змінюється форма тіла при постійному об'ємі.

## 1.2. Фізико-механічні властивості харчових матеріалів

До основних реологічних фізико-механічних властивостей харчових матеріалів належать пружність, пластичність, в'язкість та міцність.

**Пружність** – здатність тіла при деформації повністю відновлювати свою первинну форму.

**Пластичність** – здатність тіла під дією зовнішніх сил необоротно деформуватися без порушення суцільності.

**В'язкість** – ступінь опору течії (зміщенню шарів).

**Міцність** – здатність тіла приймати навантаження без руйнування й утворення залишкової деформації.

**Твердість** – комплексна властивість негуківських тіл чинити опір проникненню іншого тіла внаслідок необоротних деформацій.

При негомогенній структурній будові тіл мікротвердість у різних точках неоднакова. Через це прямої залежності між твердістю й міцністю не існує.

Твердість є деяким технічним параметром, який виражається у відносних величинах залежно від методу визначення.

Для визначення твердості застосовують такі методи: нанесення подряпин (шкала твердості за Моосом); ведення в досліджуване тіло більш твердого тіла, наприклад кульки (твердість за Брінеллем), конуса (твердість за Роквеллом), піраміди (твердість за Вікерсом).

Коефіцієнт твердості розраховують за величиною сили й геометричним параметром залишкової деформації (кулькового сегмента глибини введення).

Між коефіцієнтами твердості, отриманими за допомогою різних методів, існують певні співвідношення.

**М'якість** – властивість, протилежна твердості.

**Крихкість** – властивість твердих тіл руйнуватися без пластичної деформації.

Чисто гуківські тіла виявляють крихке руйнування при будь-якій швидкості деформації. У негуківських тіл крихке руйнування настає тільки при високих швидкостях деформації або низьких температурах, коли припиняється дія в'язких властивостей.

**Когезія** – опір тіла руйнуванню, що пов'язане з подоланням сил взаємодії між атомами й молекулами на поверхні розділення. Між роботою когезії й роботою крихкого руйнування існує пряма залежність.

**Адгезія** – властивість, яка ґрунтується на взаємодії двох різних тіл на межі поділу фаз і зумовлює зчеплення тіл.

При розділенні тіл необхідно подолати сили зчеплення. Міцність з'єднання двох тіл із різних матеріалів залежить від площини та стану поверхні контакту між тілами.

**Липкість** – властивість граничного шару в'язких або пластичних матеріалів, що контактують із поверхнею, чинити опір поділу. Липкість ґрунтується на адгезії матеріалів на поверхні розділення та когезії самого матеріалу, який випробовують.

Якщо сили когезії перевищують сили адгезії, то поділ відбувається в результаті подолання сил адгезії, й навпаки.

Якщо обидві сили приблизно рівні, поділ відбувається завдяки частковому подоланню сил когезії та адгезії.

**Зовнішнє тертя** – опір відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в зоні зіткнення поверхонь по дотичних до них. Для початку ковзання необхідно прикласти навантаження, яке перевищує сили тертя спокою.

У одного й того самого харчового матеріалу залежно від його стану й умов навантаження різною мірою проявляються ті чи інші реологічні властивості. Наприклад, макаронне тісто при миттєвому впливі навантаження поводить переважно як пружне тіло. За інших умов навантаження домінує прояв в'язких та пластичних властивостей. Насамперед необхідно з'ясувати, які властивості досліджуваного матеріалу при заданих умовах деформування є основними та визначальними.

Серед харчових мас трапляються матеріали, дуже різноманітні за своїми реологічними властивостями. Відомо багато випадків, коли в процесі технологічної обробки один і той самий продукт переходить з одного реологічного стану в інший, часто протилежний за властивостями першому. Наприклад, шоколад при литті у форму з подальшим охолодженням переходить із в'язкого (текучого) у твердий (крихкий) стан. Те саме можна спостерігати і при виробництві цукерок.

### **? Контрольні питання**

1. Розкрийте сутність поняття «реологія».
2. Який учений запропонував термін «реологія» та в якому році?
3. Назвіть види реології. Розкрийте сутність кожного з них.
4. Що являє собою деформація? Поясніть, що саме відбувається при деформації.
5. Назвіть та охарактеризуйте види деформації.
6. Розгумачте такі поняття, як «зсув», «простий зсув», «напруження», «гідростатичний тиск», «напруження зсуву».
7. Назвіть види ламінарного зміщення.
8. Перерахуйте основні реологічні фізико-механічні властивості харчових матеріалів.
9. Дайте визначення таких понять, як «пружність», «пластичність», «в'язкість», «міцність», «твердість», «м'якість», «крихкість», «когезія», «адгезія», «липкість», «зовнішнє тертя».
10. Які методи застосовують для визначення твердості?
11. Як розраховують коефіцієнт твердості?
12. Поясніть, як у наш час застосовується реологія при виробництві продукції.

### **Тести для самоконтролю**

#### **1. Теоретична реологія – це:**

- а) реологія, що займає проміжне положення між гідромеханікою та теоріями пружності, пластичності, повзучості;
- б) реологія, що займається визначенням реологічних властивостей за допомогою спеціальних приладів і випробувальних машин;
- в) реологія, що розглядає всі матеріали в тому вигляді, в якому вони постають перед спостерігачем при поверхневому огляді неозброєним оком,

тобто як однорідні й позбавлені структури (чисті рідини й досконалі мікрочастинки);

г) реологія, що досліджує деформацію та течію в мікрооб'ємах, співмірних із розмірами частинок дисперсної фази в дисперсних системах (дво- і багатофазних системах) залежно від реологічних властивостей їх компонентів.

## **2. Експериментальна реологія – це:**

а) реологія, що займає проміжне положення між гідромеханікою та теоріями пружності, пластичності, повзучості;

б) реологія, що займається визначенням реологічних властивостей за допомогою спеціальних приладів і випробувальних машин;

в) реологія, що розглядає всі матеріали в тому вигляді, в якому вони постають перед спостерігачем при поверхневому огляді неозброєним оком, тобто як однорідні й позбавлені структури (чисті рідини й досконалі мікрочастинки);

г) реологія, що досліджує деформацію та течію в мікрооб'ємах, співмірних із розмірами частинок дисперсної фази в дисперсних системах (дво- і багатофазних системах) залежно від реологічних властивостей їх компонентів.

## **3. Макрореологія (феноменологічна реологія) – це:**

а) реологія, що займає проміжне положення між гідромеханікою та теоріями пружності, пластичності, повзучості;

б) реологія, що займається визначенням реологічних властивостей за допомогою спеціальних приладів і випробувальних машин;

в) реологія, що розглядає всі матеріали в тому вигляді, в якому вони постають перед спостерігачем при поверхневому огляді неозброєним оком, тобто як однорідні й позбавлені структури (чисті рідини й досконалі мікрочастинки);

г) реологія, що досліджує деформацію та течію в мікрооб'ємах, співмірних із розмірами частинок дисперсної фази в дисперсних системах (дво- і багатофазних системах) залежно від реологічних властивостей їх компонентів.

## **4. Мікрореологія – це:**

а) реологія, що займає проміжне положення між гідромеханікою та теоріями пружності, пластичності, повзучості;

б) реологія, що займається визначенням реологічних властивостей за допомогою спеціальних приладів і випробувальних машин;

в) реологія, що розглядає всі матеріали в тому вигляді, в якому вони постають перед спостерігачем при поверхневому огляді неозброєним оком, тобто як однорідні й позбавлені структури (чисті рідини й досконалі мікрочастинки);

г) реологія, що досліджує деформацію та течію в мікрооб'ємах, співмірних із розмірами частинок дисперсної фази в дисперсних системах (дво- і багатофазних системах) залежно від реологічних властивостей їх компонентів.

### **5. Біореологія – це:**

- а) реологія, що досліджує течію різноманітних біологічних рідин, деформації різних тканин у людини та тварин;
- б) реологія, що займається визначенням реологічних властивостей за допомогою спеціальних приладів і випробувальних машин;
- в) реологія, що розглядає всі матеріали в тому вигляді, в якому вони постають перед спостерігачем при поверхневому огляді неозброєним оком, тобто як однорідні й позбавлені структури (чисті рідини й досконалі мікрочастинки);
- г) реологія, що досліджує деформацію та течію в мікрооб'єктах, співмірних із розмірами частинок дисперсної фази в дисперсних системах (дво- і багатофазних системах) залежно від реологічних властивостей їх компонентів.

### **6. Деформація – це:**

- а) ступінь інтенсивності внутрішніх сил пружності;
- б) відносний зсув часток матеріального тіла, при якому не порушується безперервність самого тіла;
- в) опір відносному переміщенню, що виникає між двома тілами в зоні зіткнення поверхонь по дотичних до них;
- г) сила, що спрямована викликати деформацію речовини шляхом зсуву вздовж площини, паралельної докладанню зусиль.

**7. Якщо під дією кінцевих сил деформація тіла збільшується в часі безперервно й необоротно, то це означає, що матеріал зазнає...**

- а) деформації;
- б) зсуву;
- в) течії;
- г) руйнування.

### **8. Деформація, яка зникає після припинення дії сили, є:**

- а) необоротною;
- б) в'язкою;
- в) пластичною;
- г) оборотною (пружною).

**9. Простий зсув є особливим випадком ламінарного зміщення, при якому тіло складається:**

- а) із тонких і товстих шарів;
- б) із двох тонких шарів;
- в) із великої кількості тонких шарів;
- г) з елементарних частинок.

### **10. Види ламінарного зміщення – це:**

- а) простий зсув та обертальний рух;
- б) поступальний (телескопічний) рух і крутіння;
- в) обертальний і поступальний (телескопічний) рух;
- г) простий зсув, обертальний рух, поступальний (телескопічний) рух і крутіння.

**11. Які види напружень розрізняють?**

- а) тільки повне напруження;
- б) тільки дотичне напруження;
- в) тільки нормальне напруження;
- г) повне, нормальне та дотичне напруження.

**12. Які напруження в гідростатичному тиску рівні між собою, а які відповідно відсутні?**

- а) нормальні; повні;
- б) нормальні; дотичні;
- в) дотичні; нормальні;
- г) дотичні; повні.

**13. Напруження зсуву – це:**

- а) ступінь інтенсивності внутрішніх сил пружності;
- б) напружений стан, при якому нормальні напруження на гранях елемента рівні між собою, а дотичні відсутні, внаслідок чого об'єм зменшується (або збільшується), але форма не змінюється;
- в) безперервність самого тіла;
- г) сила, що спрямована викликати деформацію речовини шляхом зсуву вздовж площини, паралельної докладанню зусиль.

**14. Пружність – це:**

- а) здатність тіла під дією зовнішніх сил необоротно деформуватися без порушення суцільності;
- б) здатність тіла приймати навантаження без руйнування й утворення залишкової деформації;
- в) ступінь опору течії (зміщенню шарів);
- г) здатність тіла при деформації повністю відновлювати свою первинну форму.

**15. Пластичність – це:**

- а) здатність тіла приймати навантаження без руйнування й утворення залишкової деформації;
- б) здатність тіла під дією зовнішніх сил необоротно деформуватися без порушення суцільності;
- в) здатність тіла при деформації повністю відновлювати свою первинну форму;
- г) ступінь опору течії (зміщенню шарів).

**16. В'язкість – це:**

- а) ступінь опору течії (зміщенню шарів);
- б) здатність тіла приймати навантаження без руйнування й утворення залишкової деформації;
- в) здатність тіла під дією зовнішніх сил необоротно деформуватися без порушення суцільності;

г) здатність тіла при деформації повністю відновлювати свою первинну форму.

**17. Міцність – це:**

а) здатність тіла при деформації повністю відновлювати свою первинну форму;

б) ступінь опору течії (зміщенню шарів);

в) здатність тіла приймати навантаження без руйнування й утворення залишкової деформації;

г) здатність тіла під дією зовнішніх сил необоротно деформуватися без порушення суцільності.

**18. Твердість, яка визначається за допомогою нанесення подряпин, – це:**

а) шкала твердості Вікерса;

б) шкала твердості Роквелла;

в) шкала твердості Брінелля;

г) шкала твердості Мооса.

**19. Властивість твердих тіл досягати руйнування без пластичної деформації – це:**

а) когезія;

б) крихкість;

в) липкість;

г) адгезія.

**20. Опір тіла руйнуванню, що пов'язане з подоланням сил взаємодії між атомами й молекулами на поверхні розділення, – це:**

а) липкість;

б) адгезія;

в) когезія;

г) крихкість.

**21. Властивість, яка ґрунтується на взаємодії двох різних тіл на межі поділу фаз і зумовлює зчеплення тіл, – це:**

а) адгезія;

б) когезія;

в) крихкість;

г) липкість.

**22. Властивість граничного шару в'язких або пластичних матеріалів, що контактують із поверхнею, чинити опір поділу – це:**

а) липкість;

б) когезія;

в) крихкість;

г) адгезія.

## Практичні завдання

1. Наведіть приклади харчових продуктів, для яких можна визначити та перевірити фізико-механічні властивості.
2. Порівняйте методи, за допомогою яких можна визначати твердість. Укажіть їх переваги та недоліки.


## Тема 2

### ДИСПЕРСНІ СИСТЕМИ В РЕОЛОГІЇ

**Мета:** ознайомлення із класифікацією дисперсних систем і класифікацією структур дисперсних систем; розгляд видів і форм зв'язку вологи з харчовим матеріалом; вивчення методів визначення масової частки вологи в харчових продуктах.

#### План

- 2.1. Класифікація дисперсних систем.
- 2.2. Класифікація структур дисперсних систем.
- 2.3. Види та форми зв'язку вологи з харчовим матеріалом.
- 2.4. Методи визначення масової частки вологи в харчових продуктах.

 **Ключові терміни та поняття:** дисперсійне середовище, дисперсна фаза, фаза, золь, гель, пил, дим, твердий аерозоль, рідкий аерозоль, суспензія, емульсія, піна, туман, тверда суспензія, сплав, тверда емульсія, пористе тверде тіло, тверда піна, коагуляційні структури, конденсаційно-кристалізаційні структури, тиксотропія, криві течії або деформування (реограми), хімічний зв'язок, фізико-хімічний зв'язок, фізико-механічний зв'язок, адсорбційна волога, осмотична волога, вільна волога, зв'язана волога.

#### 2.1. Класифікація дисперсних систем

Класичними об'єктами інженерної фізико-хімічної механіки є дисперсні системи, що складаються з двох чи більше фаз.

**Дисперсні системи** (лат. *dispersio* – розсіювання + грец. *systema* – комплекс, або організоване ціле) – гетерогенна система, що складається з безперервного рідкого, твердого або газоподібного середовища (дисперсійне середовище), в якому розподілена велика кількість малих частинок однієї або декількох речовин і дисперсної фази. У них **дисперсійним середовищем** є безперервна фаза, **дисперсною фазою** – роздрібнена фаза, що складається з частинок, які не контактують одна з одною.

**Фаза** – сукупність гомогенних частин системи, обмежених від інших частин фізичними поверхнями розділу.

Класифікацію харчових дисперсних систем продуктів, яка не враховує дисперсність і тип контактів між фазами, подано в таблиці 1.

При визначенні реологічної поведінки продукту (див. табл. 1) класифікаційні дані дозволяють віднести його до тієї чи іншої групи: сипучих,



рідинно- і твердоутворювальних (залежно від концентрації дисперсної фази) або твердих.

Рідинноутворювальні продукти в реології називають **золями**, а твердоутворювальні продукти – **гелями**.

Таблиця 1 – Класифікація харчових дисперсних систем продуктів

Дисперсійне середовище	Дисперсна фаза	Назва системи	Приклади продуктів (у тому числі сировина, напівфабрикат)
1	2	3	4
Газ	Тверда	Пил, дим, твердий аерозоль	Сухий порошок (або борошно) в повітрі при пневмотранспортуванні
	Рідка	Туман, рідкий аерозоль	Дисперсія молока в розпилювальній сушарці, екстракт кави в розпилювальній сушарці
Рідина	Тверда	Суспензія	Плодоовочеві або фруктові соки з м'якоттю, сиркова маса, ковбасний фарш
		Золь	Какао-маса
	Рідка	Емульсія	Масло у воді, молоко, майонез
	Газоподібна	Піна	Крем, збиті вершки, білкова піна
Тверде тіло	Тверда	Тверда суспензія, сплав	Заморожене м'ясо, макаронні вироби, шоколад, карамель
	Рідка	Тверда емульсія	Вершкове масло, маргарин
		Пористе тверде тіло, заповнене рідиною	Овочі, фрукти
Газоподібна	Пористе тверде тіло, тверда піна	Сир, морозиво, бізе, сухарі	

Продукти в таблиці 1 віднесені до тієї чи іншої системи за найголовнішими ознаками.

Наприклад, ковбасний фарш після кутерування являє собою суспензію, насичену повітряними бульбашками, тобто трифазну систему.

Наприклад, вершкове масло залежно від температури можна віднести до різних систем. Механічний вплив (різання, збивання, перемішування) також може викликати перехід з одного виду дисперсії в інший.

Складні дисперсні системи харчових продуктів подано в таблиці 2.

Таблиця 2 – Складні дисперсні системи харчових продуктів

Дисперсійне середовище	Дисперсна фаза	Приклади продуктів
1	2	3
Кристалічна форма какао-масла	Кристали цукру, тверді частинки какао, пухирці повітря	Шоколад
Кристалічна водяниста фаза	Пухирці повітря, краплі жиру, білкові макромолекули	Морозиво
Крохмальний і білковий гель	Пухирці повітря, частково кристалічні молекули крохмалю, частинки висівок	М'якуш хліба
Целюлоза, білкова оболонка	Крапельки рідини, пухирці повітря, крохмальні зерна	Фрукти, овочі, картопля, зерно, олійне насіння
Білкові макромолекули	Краплі рідини, кістки, краплі жиру	М'ясо

## 2.2. Класифікація структур дисперсних систем

Структура (внутрішня будова продукту) та характер взаємодії між окремими її елементами (частинками) визначаються хімічним складом, біохімічними показниками, температурою, дисперсністю, агрегатним станом і певними технологічними чинниками.

Структури дисперсних систем у стані термодинамічної рівноваги за П.А. Ребіндером розподіляються на дві групи:

**1. Коагуляційні структури**, в яких взаємодія між елементами відбувається через тонкий шар дисперсійного середовища й обумовлена силами Ван-дер-Ваальса. Ці структури можуть виявляти властивості неньютонівських рідин (тиксотропію, реопексію, в'язкопружність і пластичність). Термодинамічно стабільні системи, в яких із поверхнею частинок міцно з'єднані фрагменти молекул, здатні без втрати цього зв'язку розчинятись у дисперсійному середовищі.

Дисперсійне середовище знаходиться у зв'язаному стані. Коагуляційні структури володіють здатністю до самовільного відновлення після руйнування (**тиксотропія**). Наростання міцності після руйнування відбувається поступово,

зазвичай до первинної міцності. Товщина прошарків певною мірою залежить від вмісту дисперсійного середовища. При збільшенні його вмісту значення зсувних властивостей зазвичай зменшуються, а система із твердоутворювальної переходить у рідинноутворювальну. При цьому ступінь дисперсності, тобто переважаючий розмір частинок, навіть при постійній концентрації фази впливає на стан системи та її міцність.

При зневодненні коагуляційних структур (при збільшенні вмісту дисперсної фази) міцність їх підвищується, але після певної межі вони втрачають зворотно-тиксотропну здатність. Відновлюваність структури зберігається в пластично-в'язкому середовищі, коли руйнування просторового каркаса відбувається без порушення суцільності.

При найбільшому ступені ущільнення структури та найменшій товщині прошарків рідкого середовища відновлюваність і пластичність зникають, крива міцності залежно від вологи дає злам. При цьому контакти частинок залишаються ще точковими; вони можуть переходити у фазові шляхом спікання або зрощення при значному підвищенні температур.

Для опису довговічності структури, наприклад, желатину й альбуміну під дією навантаження процес руйнування розглядається як термомеханічний, коли завдяки тепловому впливу долається енергетичний бар'єр (енергія активації), послаблений впливом механічного напруження.

При утворенні коагуляційних структур у багатьох продуктах харчової промисловості суттєву роль відіграють поверхнево-активні речовини та й розчинені у воді білки, які виконують роль емульгаторів і стабілізаторів, тобто систем, що утворюються й можуть істотно змінювати їх структурно-механічні характеристики.

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.

Конденсаційно-кристалізаційні структури властиві натуральним продуктам, проте можуть утворюватись із коагуляційних структур при видаленні дисперсійної фази в розчинах.

У процесі утворення ці структури можуть мати ряд перехідних станів: коагуляційно-кристалізаційні, коагуляційно-конденсаційні. Їх утворення характеризується безперервним наростанням міцності.

**Характерними ознаками конденсаційно-кристалізаційних структур є:**

- 1) велика, порівняно з коагуляційними структурами, міцність, яка обумовлена високою міцністю самих контактів;
- 2) відсутність тиксотропії та незворотний характер руйнування;
- 3) висока крихкість і пружність через жорсткий скелет структури;
- 4) наявність внутрішніх напружень, які виникають у процесі утворення фазових контактів, що в подальшому призводять до перекристалізації та

самовільного зниження міцності аж до порушення суцільності (наприклад, розтріскування при сушці).

Таким чином, вигляд структури продукту обумовлює його якісні й технологічні показники та поведінку в процесах деформування. Для їх опису використовують криві течії або деформування (реограми), які зв'язують між собою напруження та швидкість деформації (або деформацію). Характер реограм, як правило, дає можливість віднести даний реальний продукт до того чи іншого виду реологічних тіл.

### **2.3. Види та форми зв'язку вологи з матеріалом**

Більшість продуктів харчової промисловості в тих або інших кількостях містять воду. Вода в більшості систем є дисперсійним середовищем та значною мірою визначає структуру продукту. Тому вид або форма зв'язку вологи з продуктом визначає технологічні показники продукту та його структурно-механічні характеристики.

П.О. Ребіндер запропонував класифікацію **видів зв'язку вологи з матеріалом**:

**1. Хімічний зв'язок** (іонний, молекулярний) – зв'язок, обумовлений іонними й молекулярними взаємодіями в точних кількісних співвідношеннях.

Матеріалами з хімічним зв'язком вологи є:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (іонний зв'язок) і  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (гідратна вода, молекулярний зв'язок). Для порушення цього зв'язку потрібно застосовувати прожарювання або хімічний вплив. Вона різко відрізняється за своїми властивостями від вільної.

**2. Фізико-хімічний зв'язок** (адсорбційний, осмотичний) – зв'язок, обумовлений адсорбцією вологи в гідратних оболонках або осмотичним утриманням у клітинах у певних співвідношеннях. Волога виділяється з матеріалу випарюванням, десорбцією (адсорбційна) або внаслідок різниці концентрацій (осмотична).

**Адсорбційна волога** міцно утримується на поверхні та в порах матеріалу. Ця волога зумовлює диспергування часток і пластифікацію системи. Вона звичайно властива структурам коагуляційного типу, проте може існувати й у структурах інших типів.

**Осмотична волога** викликає набрякання матеріалу (тіла); властива клітинним структурам.

Адсорбційна волога потребує для свого видалення значно більших витрат енергії, ніж волога набрякання.

Присутність адсорбційної, осмотичної вологи особливо характерна для колоїдних, полімерних і рослинних матеріалів.

**3. Фізико-механічний зв'язок** (волога в капілярах і макрокапілярах, волога змочування) – зв'язок, обумовлений утриманням вологи в осередках структури (імобілізаційна), в мікро- та макрокапілярах прилипанням її до поверхні тіла (змочування) в певних співвідношеннях. Виділяється з матеріалу випарюванням або механічними способами (віджиманням, центрифугуванням тощо).

Основна маса води перебуває у вільному стані та не змінює своїх властивостей.

Виокремлюють **вільну** та **зв'язану** вологу в харчовому матеріалі.

**Вільна волога** – волога, швидкість випарювання якої з матеріалу дорівнює швидкості випарювання води з вільної поверхні.

**Зв'язана волога** – волога, швидкість випарювання якої з матеріалу менша від швидкості випарювання води з вільної поверхні.

Наприклад, при збільшенні вмісту води її надлишок перестає бути пов'язаним із харчовим продуктом і мимовільно відділяється від продукту в процесі відстоювання, розшарування тощо.

Форми зв'язку води в харчових продуктах:

- 1) колоїдна форма (фізико-хімічна зв'язана волога);
- 2) капілярно-пориста форма (фізико-механічна зв'язана волога);
- 3) колоїдно-капілярно-пориста форма (фізико-хімічна зв'язана волога та фізико-механічна зв'язана волога). Наприклад, м'ясний фарш, сиркова маса тощо.

#### **2.4. Методи визначення масової частки води в харчових продуктах**

Методи визначення води поділяються на дві групи – **прямі та непрямі** (рис. 2).

**Прямі методи** ґрунтуються на розділенні матеріалу на суху речовину й воду з використанням тепла, безводних розчинників і хімічних реактивів.

**Непрямі методи** ґрунтуються на вимірюванні зміни фізичних величин і властивостей, функціонально пов'язаних із вологістю матеріалів.

### **? Контрольні питання**

1. Що являють собою дисперсні системи? Чим відрізняється дисперсійне середовище від дисперсійної фази?
2. Розкрийте сутність поняття «фаза».
3. Як у реології називаються рідинноутворювальні та твердоутворювальні продукти?
4. Перерахуйте дисперсійні середовища та дисперсійні фази.
5. Надайте класифікацію харчових дисперсних систем. Наведіть приклади систем.
6. На які структури можна розподілити харчові продукти згідно із класифікацією П.А. Ребіндера?
7. Розкрийте сутність тиксотропії. Поясніть, як вона відбувається.
8. Назвіть характерні ознаки конденсаційно-кристалізаційних структур.
9. Надайте класифікацію видів зв'язку води з матеріалом (за П.О. Ребіндером).
10. Як класифікується волога в харчовому матеріалі?
11. Укажіть форми зв'язку води у продуктах.
12. Назвіть методи визначення масової частки води в харчових продуктах.

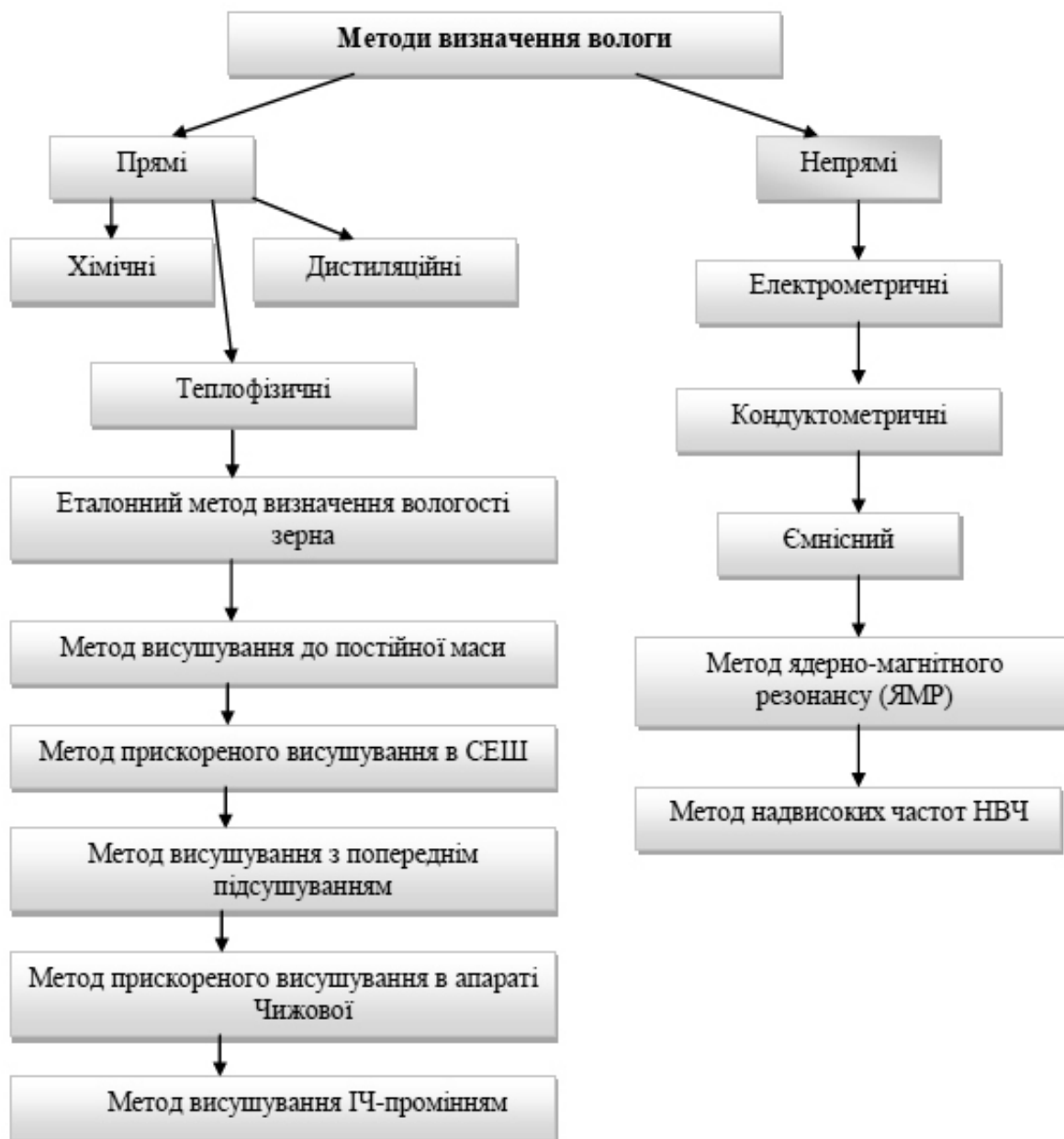


Рисунок 2 – Методи визначення масової частки вологи в харчових продуктах

### Тести для самоконтролю

**1. Із якої кількості фаз складається дисперсна система?**

- а) з однієї;
- б) із безлічі;
- в) із двох;
- г) із двох і більше.

**2. Фаза – це:**

- а) здатність тіла приймати навантаження;
- б) сукупність гомогенних частинок системи, що межують одна з одною;
- в) сукупність гетерогенних частинок системи, що межують одна з одною;

г) здатність тіла не приймати навантаження.

**3. Укажіть дисперсні фази, обравши правильну повну відповідь:**

- а) газ, рідина, пар;
- б) суха, тверда, волога;
- в) газ, рідина, тверде тіло;
- г) газ, рідина.

**4. Укажіть приклад харчового продукту, якщо дисперсійне середовище – газ, дисперсна фаза – тверда:**

- а) сухий порошок (або борошно) в повітрі при пневмотранспортуванні;
- б) екстракт кави при розпилювальній сушці;
- в) морозиво;
- г) збиті вершки.

**5. Укажіть приклад харчового продукту, якщо дисперсійне середовище – тверде тіло, дисперсна фаза – газоподібна:**

- а) макаронні вироби, шоколад, карамель;
- б) заморожене м'ясо;
- в) морозиво, бізе, сухарі;
- г) масло, маргарин.

**6. За класифікацією П.О. Ребіндера структуру харчових продуктів розподіляють на:**

- а) коагуляційні та конденсаційно-рідинні структури;
- б) конденсаційно-рідинні та пластично-в'язкі структури;
- в) коагуляційні та конденсаційно-кристалізаційні структури;
- г) пластично-в'язкі та коагуляційні структури.

**7. Явище, при якому структури володіють здатністю до самовільного відновлення після руйнування, – це:**

- а) когезія;
- б) адгезія;
- в) необоротна деформація;
- г) тиксотропія.

**8. Після руйнування наростання міцності відбувається поступово. До якої міцності?**

- а) первинної;
- б) вторинної;
- в) третинної;
- г) четвертинної.

**9. На що впливає ступінь дисперсності при постійній концентрації фази?**

- а) на стан системи та в'язкість;
- б) на стан системи та її міцність;

- в) на температуру системи та її енергію;
- г) на енергію системи та її міцність.

**10. При описі довговічності структури альбуміну й желатину під навантаженням П.О. Ребіндера процес руйнування розглядають як...**

- а) терморегуляційний;
- б) термохімічний;
- в) термомеханічний;
- г) термофізичний.

**11. Волога, що міцно утримується на поверхні й у порах матеріалу, – це:**

- а) осмотична волога;
- б) вільна волога;
- в) зв'язана волога;
- г) адсорбційна волога.

**12. Волога, що викликає набрякання матеріалу (тіла) та властива клітинним структурам, – це:**

- а) адсорбційна волога;
- б) вільна волога;
- в) зв'язана волога;
- г) осмотична волога.

**13. Волога, швидкість випарювання якої з матеріалу дорівнює швидкості випарювання води з вільної поверхні, – це:**

- а) зв'язана волога;
- б) осмотична волога;
- в) вільна волога;
- г) адсорбційна волога.

**14. Волога, швидкість випарювання якої з матеріалу менша від швидкості випарювання води з вільної поверхні, – це:**

- а) осмотична волога;
- б) зв'язана волога;
- в) вільна волога;
- г) адсорбційна волога.

**15. Фізико-хімічна зв'язана волога належить до:**

- а) колоїдної форми;
- б) колоїдно-капілярно-пористої форми;
- в) колоїдно-капілярної форми;
- г) капілярно-пористої форми.

**16. Фізико-механічна зв'язана волога належить до:**

- а) колоїдно-капілярно-пористої форми;
- б) колоїдної форми;
- в) капілярно-пористої форми;



г) колоїдно-капілярної форми.

**17. Фізико-хімічна зв'язана волога та фізико-механічна зв'язана волога належить до:**

- а) колоїдної форми;
- б) колоїдно-капілярної форми;
- в) колоїдно-капілярно-пористої форми;
- г) капілярно-пористої форми.

### **Практичне завдання**

1. Наведіть приклади харчових продуктів відносно основної класифікації дисперсних систем.

## **Тема 3**

### **РЕОЛОГІЧНІ РІВНЯННЯ ТА РЕОЛОГІЧНІ ТІЛА**

**Мета:** ознайомлення із класифікацією реологічних тіл; засвоєння основних реологічних рівнянь і способу їх складання; з'ясування особливостей течії реальних харчових мас.

### **План**

3.1. Загальна характеристика основних рівнянь реології. Класифікація реологічних тіл на основі механічних і математичних моделей.

3.2. Особливості течії реальних харчових мас.

**✍ Ключові терміни та поняття:** реологічне рівняння стану середовища, тверді тіла, твердоподібні тіла, твердо-рідкі тіла, рідиноподібні тіла, тиксотропні системи, реопектні системи, напруження зсуву, швидкість зсуву, плинність, харчові маси, ефективна в'язкість, структурована система, закон зміни ефективної в'язкості.

### **3.1. Загальна характеристика основних рівнянь реології. Класифікація реологічних тіл на основі механічних і математичних моделей**

Багато реологічних середовищ є дисперсними системами двох або трьох фаз: це невеликого розміру тверді частинки, розподілені у в'язкій рідині (суспензія або гель, якщо тверда фаза домінує), або це дрібні краплі однієї рідини в іншій (емульсія), або пухирці повітря в рідині (піна) та ін. (див. табл. 1). *Реологія досліджує співвідношення між напруженням, що діє на тіло, та його деформацією.*

Математична модель механічних властивостей даного середовища описується рівнянням, що зв'язує напруження, яке є в деякій точці середовища, та деформацію, що виникає внаслідок цього. Це рівняння може включати швидкості напружень, деформацій та ін.; воно називається **реологічним рівнянням стану середовища.**

Сутність основного простого способу складання реологічного рівняння стану полягає в тому, що кожному властивість середовища можна модулювати відповідним елементом, тобто **пружність** – пружиною, **в'язкість** – поршнем у циліндрі з в'язкою рідиною, **пластичність** – елементом із сухим тертям.

З'єднуючи тим чи іншим способом ці елементи, отримують модель зразка для механічних досліджень, властивість якого в загальних рисах можливо визначити теоретично. Це дозволяє, вивчивши досліди з конкретним матеріалом, підібрати таке поєднання елементів, яке забезпечить якісну відповідність у ході реального досліду.

Підбираючи жорсткість пружини, в'язкість олії в поршні, величину коефіцієнта сухого тертя можна за рахунок точного збігу експериментальних кривих та їх модельного представлення.

Харчові продукти при заготівлі, транспортуванні, збереженні та особливо при переробці піддаються різним механічним впливам. При цьому виробничі процеси мають бути організовані так, щоб забезпечити максимально високий рівень якості готових продуктів. Харчові продукти, включаючи сировину та напівфабрикати, залежно від складу, дисперсної будови та структури володіють різними реологічними властивостями й текстурними ознаками.

Б.О. Ніколаєв запропонував загальну класифікацію (від твердого до істинно в'язкого стану) за величиною механічних властивостей (модулі пружності, в'язкості) та виділив 3 групи тіл:

- 1) тверді та твердоподібні тіла (твердий жир, цілі тканини м'яса);
- 2) твердо-рідкі тіла (м'ясний фарш, драглі, сир);
- 3) рідиноподібні тіла (розплавлений жир, бульйони, молоко, вода).

Розрізняють 2 види систем:

1) **тиксотропні системи** – системи, в яких напруження зсуву та ефективна в'язкість зменшуються під час зсуву;

2) **реопектні системи** – системи, в яких напруження зсуву та ефективна в'язкість збільшуються з часом при впливі на систему дотичних напружень і постійному градієнті швидкості.

Залежно від періоду релаксації Н.В. Михайлов та П.О. Ребіндер поділяють реологічні тіла на:

1) **рідноподібні тіла** – ньютонівські рідини та структуровані системи, що не мають статичного напруження зсуву;

2) **твердоподібні тіла** – пружно-пластичні, умовно-пластичні тіла й тіла, що володіють динамічним напруженням зсуву.

### 3.2. Особливості течії реальних харчових мас

При течії матеріалу реакція (R) залежить від сили (P) та площі верхньої або нижньої пластини в'язко-деформуючого матеріалу (F) (рис. 3).

Напруження зсуву  $\tau$  (Па) розраховують за формулою:

$$\tau = \frac{P}{F} \quad (1)$$

де  $P$  – сила;

$F$  – площа верхньої або нижньої пластини, м.

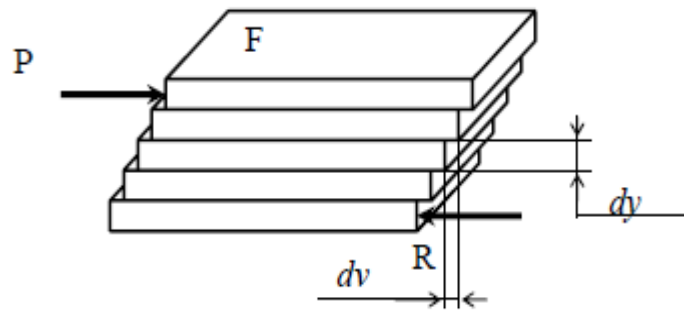


Рисунок 3 – Зсув матеріалу між двома пластинами в'язко-деформуючого матеріалу

Швидкість зсуву  $\dot{\gamma}$  ( $\text{с}^{-1}$ ) розраховують за формулою:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

де  $dv$  – швидкість зсуву елементарного шару відносно сусіднього шару, м/с;  
 $dy$  – товщина елементарного шару, м.

Для ньютонівських матеріалів напруження зсуву  $\tau$  пропорційне в'язкості  $\mu$  ( $\text{Па} \cdot \text{с}$ ) та швидкості зсуву  $\dot{\gamma}$  ( $\text{с}^{-1}$ ):

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

де  $\mu$  – в'язкість,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву,  $\text{с}^{-1}$ .

В'язкість не залежить від швидкості зсуву, а змінюється залежно від температури, тиску в даній системі.

**Плинність** – величина, зворотна в'язкості.

Течія реальних матеріалів, що переробляються в харчовій промисловості, погано описується рівнянням (3). Це рівняння містить коефіцієнт в'язкості  $\mu$ , який є константою, тобто для даного матеріалу він постійний і не залежить від прикладених напружень та від виниклих при цьому швидкостей зсуву шарів рідини один відносно одного.

Коефіцієнт в'язкості  $\mu$ , що характеризує високу чи низьку опірність зрушенню шарів один відносно одного, є величиною непостійною та залежить від величини прикладених напружень або швидкостей зсуву.

Якщо необхідно враховувати масу середовища, що вимірюють, то визначають кінематичну в'язкість  $\nu$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

де  $\mu$  – в'язкість, Па · с;  
 $\rho$  – щільність середовища, кг/м<sup>3</sup>.

У більшості харчових мас, що переробляються, коефіцієнт в'язкості зменшується зі зростанням напружень або швидкостей зсуву.

**Харчові маси** – це структуровані системи, що мають певну макро- і мікроструктуру.

Наприклад, густа маса для виготовлення цукерок (праліне) – це какао-масло, в якому є подрібнені, неправильної форми шматочки смаженого горіха та кристалики цукру. Після приготування маси всі її компоненти взаємно розташувалися, з'єдналися. При прикладанні напруження починається зсув шарів один відносно одного, з певним опором, що визначається організованою структурою.

Чим вищі прикладені напруження та швидкості зсуву, тим інтенсивніше відбувається розрив зв'язків компонентів структури, частинки неправильної форми все більше орієнтуються за потоком. За рахунок цього відбувається зменшення опору зсуву шарів один відносно одного, тобто знижується в'язкість, що визначається коефіцієнтом в'язкості та називається **ефективною в'язкістю** ( $\mu_{\text{еф}}$ ).

$$\mu_{\text{еф}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

Тобто у ньютонівської ідеальної в'язкості рідини коефіцієнт в'язкості постійний, а в реальних харчових рідинах коефіцієнт ефективною в'язкості ( $\mu_{\text{еф}}$ ) не є постійним.

Найбільш часто відзначається «аномальна» в'язка течія харчових мас. Не всі реальні рідини підпорядковуються «нормальному» ньютонівському закону.

У 30-і роки ХХ ст. Оствальд ввів поняття «**структурована система**», для якої можна спостерігати **закон зміни ефективною в'язкості** (рис. 4).

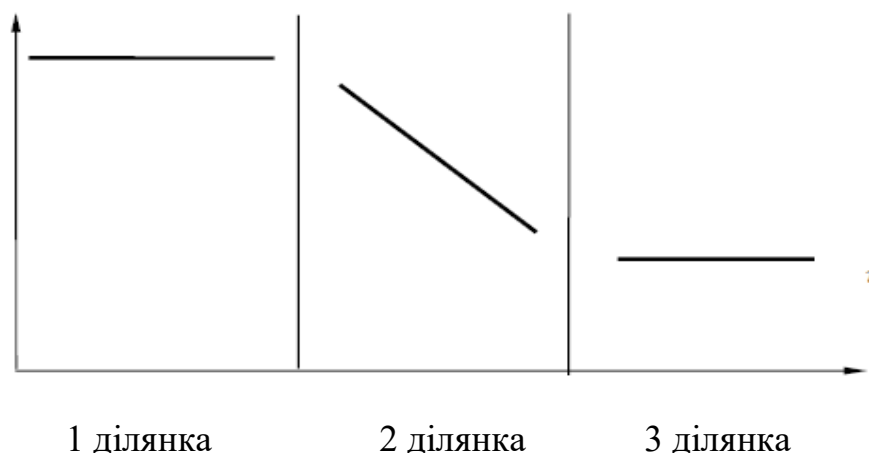


Рисунок 4 – Залежність ефективною в'язкості від напруження структурованих систем

У реальних харчових мас, структурованих систем можна спостерігати 3 ділянки:

1) ділянка 1 – малі зсувні напруження; практично незруйнована структура й відповідна їй висока ефективна в'язкість ( $\mu_{ef}$ ), що носить ньютонівський характер;

2) ділянка 2 – зростання напружень; подальше руйнування структури; ефективна в'язкість ( $\mu_{ef}$ ) набуває все меншого значення;

3) ділянка 3 – практично зруйнована структура; знову починається ньютонівська течія, але вже з найменшим значенням ефективної в'язкості ( $\mu_{ef}$ ).

### **? Контрольні питання**

1. Що таке реологічне рівняння стану середовища? Розкрийте сутність простого способу складання реологічного рівняння.

2. Наведіть загальну класифікацію тіл за величиною механічних властивостей.

3. Що таке тиксотропні та реопектні системи? У чому полягає відмінність між ними?

4. Як поділяються реологічні тіла залежно від періоду релаксації?

5. Як розрахувати напруження зсуву? Укажіть одиниці вимірювання напруження зсуву.

6. Як розрахувати швидкість зсуву? Укажіть одиниці вимірювання швидкості зсуву.

7. Як розрахувати напруження зсуву для ньютонівських матеріалів? Укажіть одиниці вимірювання напруження зсуву для ньютонівських матеріалів.

8. Що таке плинність?

9. Як розрахувати кінематичну в'язкість? Укажіть одиниці вимірювання кінематичної в'язкості.

10. Що таке харчові маси? Наведіть приклади харчових мас при виробництві харчових продуктів.

11. Як розрахувати ефективну в'язкість? Укажіть одиниці вимірювання ефективної в'язкості.

12. Хто ввів у науковий обіг поняття «структурована система»? Поясніть залежність ефективної в'язкості від напруження структурованих систем.

### **Тести для самоконтролю**

**1. Яким елементом модулюють і позначають пружність?**

а) поршнем у циліндрі з в'язкою рідиною;

б) пружиною;

в) елементом із сухим тертям;

г) поршнем у циліндрі з в'язкою рідиною та пружиною.

**2. Яким елементом модулюють і позначають в'язкість?**

а) поршнем у циліндрі з в'язкою рідиною;

- б) елементом із сухим тертям;
- в) пружиною;
- г) поршнем у циліндрі з в'язкою рідиною та пружиною.

**3. Яким елементом модулюють та позначають пластичність?**

- а) поршнем у циліндрі з в'язкою рідиною;
- б) поршнем у циліндрі з в'язкою рідиною та пружиною;
- в) елементом із сухим тертям;
- г) пружиною.

**4. Тиксотронні системи – це:**

- а) системи, в яких напруження зсуву й ефективна в'язкість зменшуються під час зсуву;
- б) системи, в яких напруження зсуву й ефективна в'язкість збільшуються з часом при впливі на систему дотичних напружень і постійному градієнті швидкості;
- в) структуровані системи, що не мають статичного напруження зсуву;
- г) структуровані системи, що мають статичне напруження зсуву.

**5. Реопектні системи – це:**

- а) системи, в яких напруження зсуву й ефективна в'язкість зменшуються під час зсуву;
- б) структуровані системи, що мають статичне напруження зсуву;
- в) структуровані системи, що не мають статичного напруження зсуву;
- г) системи, в яких напруження зсуву й ефективна в'язкість збільшуються з часом при впливі на систему дотичних напружень і постійному градієнті швидкості.

**6. Що означає  $F$  у формулі для визначення напруження зсуву?**

- а) швидкість зсуву;
- б) площу верхньої або нижньої пластини;
- в) в'язкість;
- г) густину середовища.

**7. Для яких речовин коефіцієнт в'язкості непостійний?**

- а) для реальних харчових рідин;
- б) для ньютонівських мас;
- в) для твердих речовин;
- г) для газоподібних речовин.

**8. У більшості харчових мас, що переробляються, коефіцієнт в'язкості ...**

- а) зменшується зі зростанням напружень або швидкостей зсуву;
- б) збільшується зі зростанням напружень або швидкостей зсуву;
- в) залишається незмінним;
- г) одночасно може збільшуватися або зменшуватися зі зростанням напружень або швидкостей зсуву.

## Практичне завдання

1. Напишіть основні формули для розрахунку:
  - напруження зсуву;
  - швидкості зсуву;
  - кінематичної та ефективної в'язкості.

### Тема 4

## МЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ В РЕОЛОГІЇ

**Мета:** засвоєння основних реологічних властивостей реальних тіл; вивчення механічних моделей, що відображають елементарні реологічні властивості харчових мас; засвоєння розрахункових формул.

### План

4. Моделі, що відображають реологічні властивості харчових мас, – механічні моделі:

- 4.1. Тіло Гука.
- 4.2. Тіло Ньютона.
- 4.3. Тіло Сен-Венана-Кулона.
- 4.4. Тіло Ренкіна.
- 4.5. Тіло Пелега.

 **Ключові терміни та поняття:** тіло Гука, тіло Ньютона, тіло Сен-Венана-Кулона, тіло Ренкіна, тіло Пелега.

### 4. Моделі, що відображають реологічні властивості харчових мас, – механічні моделі

У реології різні матеріали представлені механічними моделями, що складаються з простих ідеалізованих тіл.

**Механічні моделі** дозволяють отримати уявлення, як поводить ся той чи інший матеріал під дією навантаження.

За механічними моделями складають математичні рівняння залежності різних параметрів:

- дотичних ( $\tau$ ) і нормальних напружень ( $\sigma$ );
- кутових ( $\gamma$ ) і лінійних ( $\varepsilon$ ) деформацій;
- швидкостей зміни кутових ( $\dot{\gamma}$ ) і лінійних деформацій ( $\dot{\varepsilon}$ );
- часу ( $t$ ).

Залежності параметрів між собою показують на графіках.

При складанні механічних моделей беруть до уваги той факт, що деформація складного тіла є результатом накладання деформацій елементарних механічних моделей ідеалізованих тіл, які відображають основні реологічні властивості.

До **основних реологічних властивостей** реальних тіл належать: в'язкість, пружність, пластичність.

#### 4.1. Тіло Гука

Механічною моделлю ідеально пружного твердого тіла є пружина – тіло Гука (рис. 5).

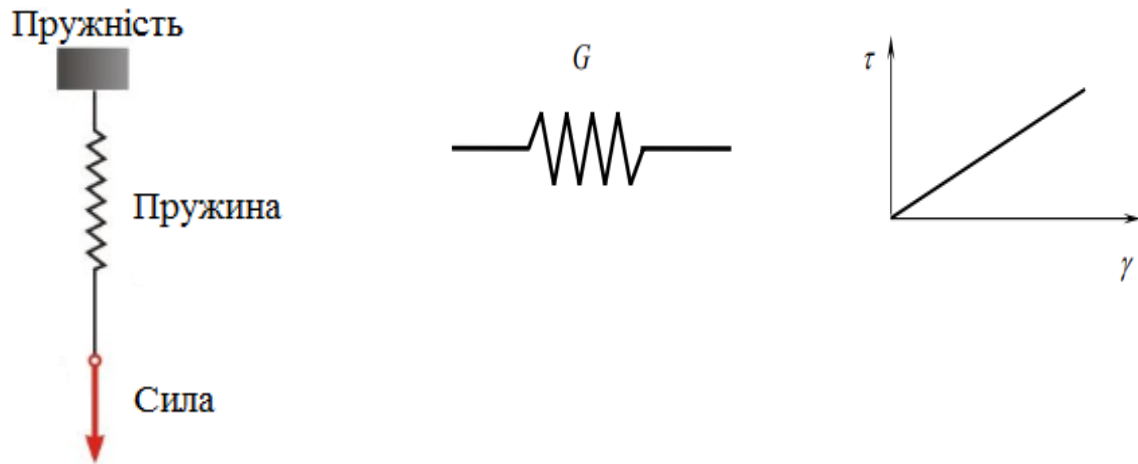


Рисунок 5 – Механічна модель ідеально пружного твердого тіла Гука

Відповідною математичною моделлю є реологічне рівняння гуківського твердого тіла для простого зсуву. Розраховують за формулою:

$$\tau = \frac{G}{\gamma} \quad (6)$$

де  $\tau$  – напруження зсуву;  
 $G$  – модуль зсуву;  
 $\gamma$  – кутова деформація.

Реологічною константою є модуль зсуву  $G$ .

Напруження зсуву ( $\tau$ ), що виникає в цьому тілі, прямо пропорційне деформації.

Для розтягнення-стиснення нормальне напруження розраховують за формулою:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (7)$$

де  $E$  – модуль пружності;  
 $\varepsilon$  – лінійна деформація.

#### 4.2. Тіло Ньютона

Механічною моделлю ідеально в'язкої рідини є гідравлічний поршень – тіло Ньютона (рис. 6).



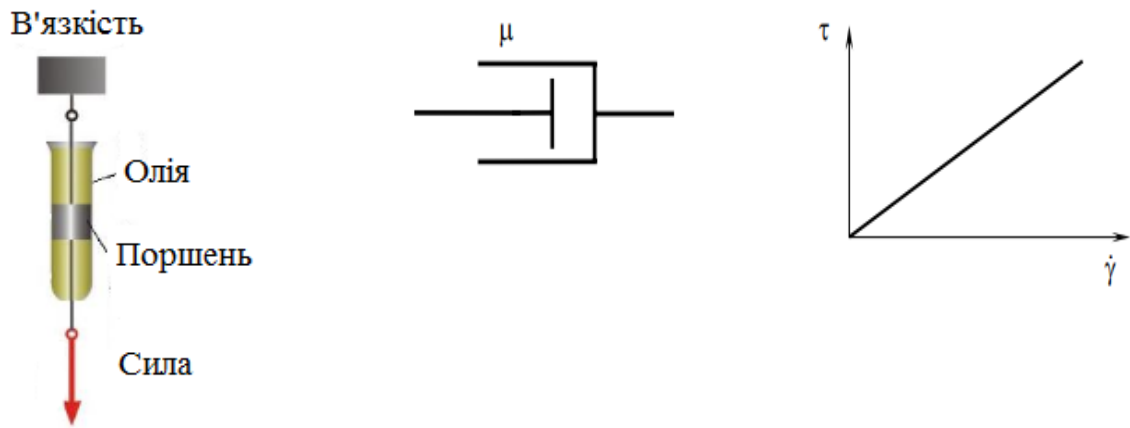


Рисунок 6 – Механічна модель ідеально в'язкого тіла Ньютона

Відповідною математичною моделлю є реологічне рівняння стану ньютонівського тіла для простого зсуву. Розраховують за формулою:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (8)$$

де  $\tau$  – напруження зсуву;  
 $\mu$  – в'язкість (Па · с);  
 $\dot{\gamma}$  – швидкість кутової деформації.

Реологічною константою є в'язкість  $\mu$ .

Напруження зсуву  $\tau$ , яке виникає в ідеально в'язкому тілі, прямо пропорційне швидкості кутової деформації.

#### 4.3. Тіло Сен-Венана-Кулона

Механічною моделлю ідеально пластичного тіла є пара тертя – тіло Сен-Венана-Кулона (рис. 7).

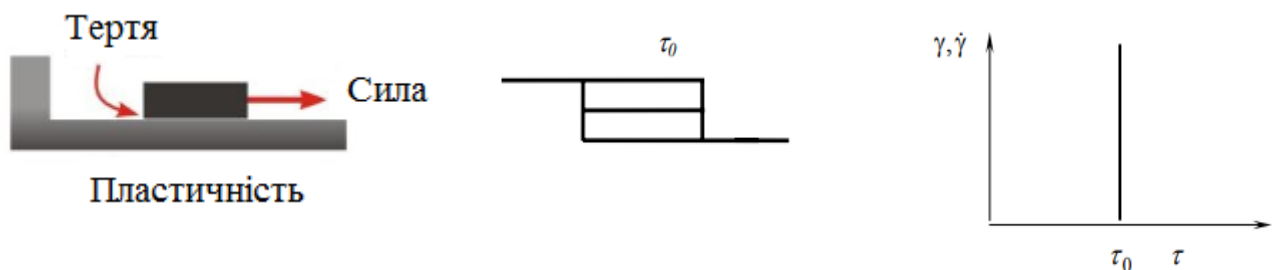


Рисунок 7 – Механічна модель ідеально пластичного тіла Сен-Венана-Кулона

Тіло Сен-Венана-Кулона є непіддатливим ( $\varepsilon = 0$ ;  $\dot{\varepsilon} = 0$ ;  $\gamma = 0$ ;  $\dot{\gamma} = 0$ ) при навантаженні, меншому від межі плинності ( $\sigma < \Theta_0$  або  $\tau < \tau_0$ ), а після перевищення ( $\sigma \geq \Theta_0$  або  $\tau \geq \tau_0$ ) воно необмежено деформується ( $\varepsilon \rightarrow \infty$ ;  $\dot{\varepsilon} \rightarrow \infty$ ;  $\gamma \rightarrow \infty$ ;  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ), при цьому в тілі виникають напруження, що дорівнюють межі плинності ( $\sigma = \Theta_0$ ;  $\tau = \tau_0$ ).

Межа плинності  $\tau_0$  є реологічною константою елемента пластичності.

#### 4.4. Тіло Ренкіна

Механічною моделлю твердого тіла є пара зчеплених пластин – тіло Ренкіна (рис. 8).

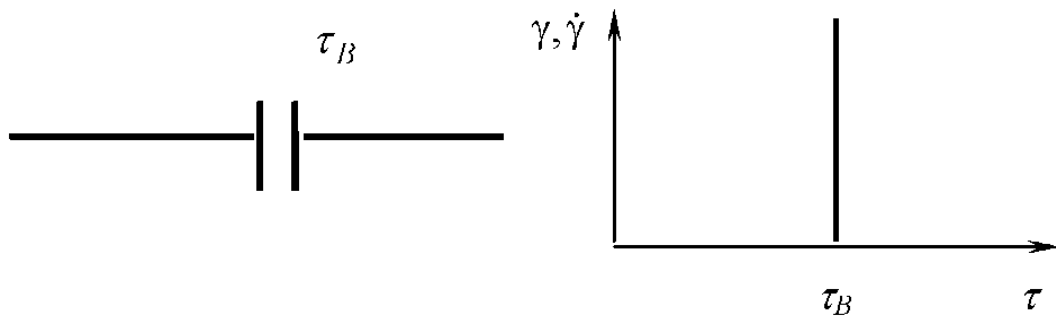


Рисунок 8 – Механічна модель твердого тіла Ренкіна

Реологічною константою є межа міцності  $\tau_B$  або  $\sigma_B$ . Якщо при навантаженні досягти межі міцності ( $\tau = \tau_B$ ), зчеплені пластини необоротно роз'єднуються ( $\gamma \rightarrow \infty$ ;  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ).

При навантаженні, меншому від межі міцності ( $\tau < \tau_B$ ), тіло є непіддатливим ( $\gamma = 0$ ;  $\dot{\gamma} = 0$ ).

#### 5.5 Тіло Пелега

Механічна модель твердого тіла враховує необоротну миттєву деформацію – тіло Пелега (рис. 9).



Рисунок 9 – Механічна модель твердого тіла Пелега

При навантаженні тіло Пелега спочатку деформується в межах  $0 \leq \gamma \leq \gamma_k$ , а після досягнення контакту поводить себе як тверде тіло.

#### ? Контрольні питання

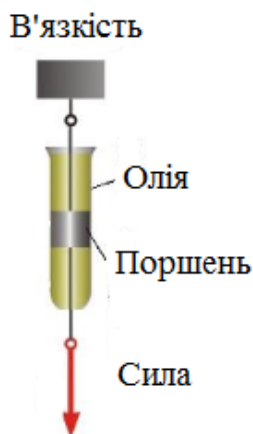
1. Які параметри враховують при складанні математичних реологічних рівнянь?
2. Перерахуйте основні реологічні властивості реальних тіл.
3. Що є механічною моделлю ідеально пружного твердого тіла?
4. Як позначається модуль зсуву?
5. Що є механічною моделлю ідеально в'язкого тіла?
6. Що є механічною моделлю ідеально пластичного тіла?
7. Що є механічною моделлю твердого тіла?
8. Охарактеризуйте механічну модель тіла Пелега.

## Тести для самоконтролю



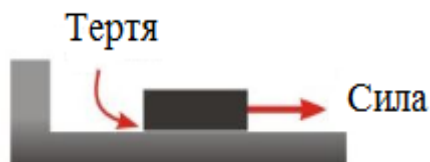
1. На рисунку зображено:

- а) механічну модель твердого тіла Ренкіна;
- б) механічну модель ідеально пластичного тіла Сен-Венана-Кулона;
- в) механічну модель ідеально пружного тіла Гука;
- г) механічну модель твердого тіла Пелега.



2. На рисунку зображено:

- а) механічну модель твердого тіла Ренкіна;
- б) механічну модель ідеально пластичного тіла Сен-Венана-Кулона;
- в) механічну модель ідеально пружного тіла Гука;
- г) механічну модель ідеально в'язкого тіла Ньютона.



3. На рисунку зображено:

- а) механічну модель ідеально пластичного тіла Сен-Венана-Кулона;
- б) механічну модель твердого тіла Ренкіна;
- в) механічну модель ідеально пружного тіла Гука;
- г) механічну модель ідеально в'язкого тіла Ньютона.

## Практичне завдання

1. Змоделуйте механічні моделі тіла Гука, тіла Ньютона, тіла Сен-Венана-Кулона, тіла Ренкіна, тіла Пелега для харчових матеріалів.

### Тема 5

## ЗМІНИ РЕОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ


**Мета:** ознайомлення зі змінами реологічних моделей; вивчення механічної моделі тіла Кельвіна; вивчення механічної моделі тіла Максвелла.

### План

5.1. Зміни реологічних моделей, що описують поведінку реальних матеріалів (модель в'язко-пластичного тіла Шведова-Бінгама, модель пружно-пластичного тіла).

5.2. Механічна модель тіла Кельвіна (тіла Фойгта).

5.3. Механічна модель тіла Максвелла.

 **Ключові терміни та поняття:** модель в'язко-пластичного тіла Шведова-Бінгама, модель пружно-пластичного тіла, механічна модель тіла Кельвіна (тіла Фойгта), механічна модель тіла Максвелла.

### 5.1. Зміни реологічних моделей, що описують поведінку реальних матеріалів (модель в'язко-пластичного тіла Шведова-Бінгама, модель пружно-пластичного тіла)

Реологічні рівняння поведінки реальних матеріалів під навантаженнями являють собою опис властивостей реального матеріалу як комбінацію тих чи інших ідеальних властивостей.

Наприклад, є в'язкий матеріал – ідеальний ньютонівський; є пластичний матеріал – ідеальний сен-венанівський; є реальний матеріал – в'язко-пластичний, що поєднує властивості в'язкості та пластичності.

Наприклад, якщо прикладаємо напруження – немає течії навіть із низькою швидкістю; збільшуємо напруження – все ще немає течії.

Після досягнення певної величини  $\tau_0$  починається в'язка течія з певним значенням в'язкості, яке називається **пластичною в'язкістю** ( $\mu_{nl}$ ).

Механічна модель такої поведінки називається **в'язко-пластичним тілом Шведова-Бінгама** (рис. 10). Реологічне рівняння залежності при  $\tau > \tau_0$  має такий вигляд:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{nl} \cdot \dot{\gamma} \quad (9)$$

де  $\tau_0$  – межа плинності;

$\mu_{nl}$  – пластична в'язкість, Па · с;

$\dot{\gamma}$  – швидкість кутової деформації.

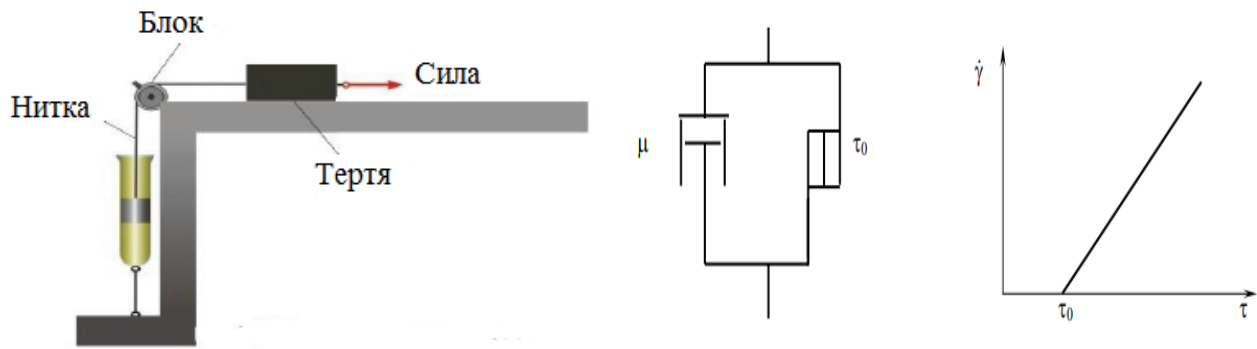


Рисунок 10 – Механічна модель в'язко-пластичного тіла Шведова-Бінгама

**Механічною моделлю пружно-пластичного тіла** є послідовне з'єднання пружного елемента Гука та пластичного елемента Сен-Венана-Кулона (рис. 11).

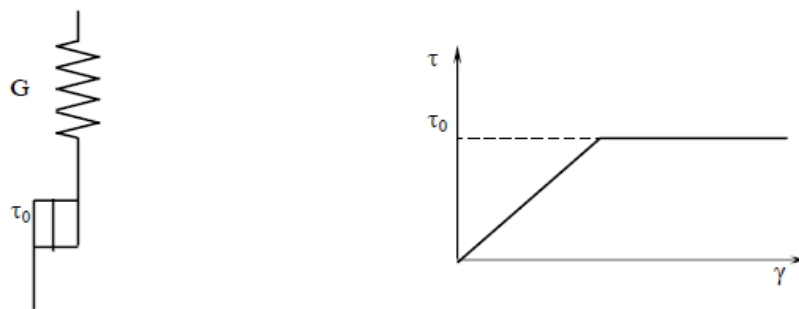


Рисунок 11 – Механічна модель пружно-пластичного тіла

При невеликих напруженнях це тіло поводить себе як пружне, а при перевищенні певної величини  $\tau_0$  спостерігається пластична течія.

## 5.2. Механічна модель тіла Кельвіна (тіла Фойгта)

У 1890 р. Кельвін увів у науковий обіг поняття «в'язкість твердого тіла».

**Механічна модель тіла Кельвіна** – це паралельно з'єднані елементи Гука та Ньютона з реологічними характеристиками  $G$  і  $\mu$  (рис. 12).

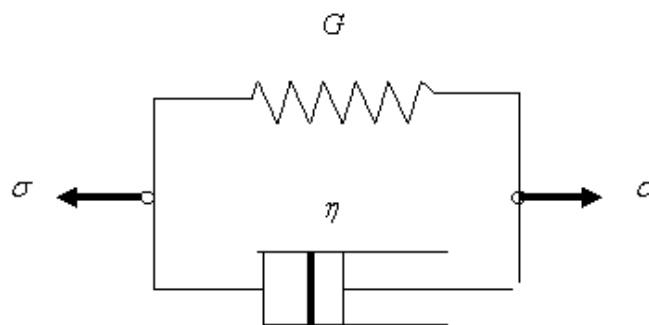


Рисунок 12 – Механічна модель тіла Кельвіна

При записі математичної моделі тіла Кельвіна необхідно звернути увагу на те, що при паралельному з'єднанні елементів деформація складного тіла  $\gamma_K$  дорівнює деформації кожного елемента, а напруження сумарного елемента  $\tau_K$  дорівнює сумі напружень в окремих елементах  $\tau_G$  і  $\tau_H$ .

Це дозволяє записати систему рівнянь:

$$\begin{cases} \gamma_K = \gamma_G = \gamma_H \\ \tau_K = \tau_G = \tau_H \end{cases} \quad (10)$$

Якщо скористатися реологічними рівняннями елементів Гука і Ньютона, тоді:

$$\begin{aligned} \tau_K &= G \cdot \gamma_G \\ \tau_H &= \mu \cdot \dot{\gamma}_H \end{aligned} \quad (11)$$

З урахуванням рівнянь 10 та 11 отримують математичну модель тіла Кельвіна в такому вигляді:

$$\tau = G \cdot \gamma + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (12)$$

Кельвін увів це тіло для того, щоб мати можливість показати властивість в'язкої течії для «твердого» тіла.

Явище, що характеризується самовільним розвитком деформації при постійному значенні прикладених напружень називається **повзучістю**.

Розв'язавши відносно  $\gamma$  рівняння тіла Кельвіна, при  $\tau = \tau_c = \text{const}$ , одержують рівняння кривої повзучості  $\gamma = \gamma(t)$  (крива кінетики деформації):

$$\gamma = \frac{\tau_c}{G} + \frac{c \cdot e^{-Gt}}{\mu} \quad (13)$$

де  $c$  – довільна стала інтегрування, що визначається з вихідних умов.

У цьому випадку при  $t = 0$ ,  $\gamma = \gamma_0 = 0$ , значення довільної постійної становитиме:

$$c = -\frac{\tau_c}{G} \quad (14)$$

При прагненні  $t \rightarrow \infty$  деформація  $\gamma$  асимптотично наближається до значення  $\frac{\tau_c}{G}$ .

Для тіла Гука пружні деформації визначаються співвідношенням:

$$\gamma = \frac{\tau_c}{G} \quad (15)$$

при прикладанні напруження  $\tau = \tau_0$  має місце деформація, що виникає миттєво та дорівнює  $\gamma = \frac{\tau_c}{G}$ , тобто деформація, яка дорівнює тому значенню, якого врешті-решт досягне деформація в тілі Кельвіна при дії на нього

напруження  $\tau_c$ . Цим пояснюється часто вживана назва однієї з характерних властивостей тіла Кельвіна – *запізнена пружність*. Тобто не миттєва, як у тілі Гука, але така, яка досягає того самого значення, що і в тілі Гука.

### 5.3. Механічна модель тіла Максвелла

У 1920 р. Гесс спостерігав незвичну поведінку в'язкої рідини.

Наприклад, 1,5%-й розчин крохмалю, поміщений у посудину, зовні нагадував в'язку рідину. У ході досліду посудину обертали навколо осі та різко зупиняли. Рідина в ньому продовжувала обертатися зі швидкістю, що знижувалася в силу наявності в'язкості.

Аналогічний дослід було проведено з розчином гліцеролу у воді.

Виявилось, що в разі загасання обертання розчину гліцеролу з водою, який має, як здавалося, ту саму в'язкість, що й розчин крохмалю, досліджувана суміш зрештою зупинялася.

При дослідженні 1,5%-го розчину крохмалю загасання обертання відбувалося таким чином: обертання (припустімо за годинниковою стрілкою) поступово згасало і, припинившись, мимовільно розпочиналося знову, але вже у зворотному (проти годинникової стрілки) напрямку. Потім – чергова зупинка й обертання за годинниковою стрілкою.

В'язка рідина виявляла пружні властивості (загасання пружних коливань сталевієї пружини – тіла Гука).

Для опису такої поведінки як перше наближення можна взяти реологічну модель – **тіло Максвелла**.

Механічний варіант тіла Максвелла являє собою послідовно з'єднані елементи Гука і Ньютона (рис. 13).

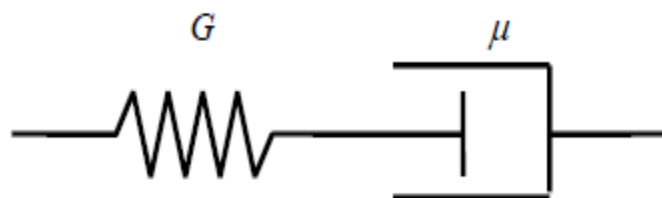


Рисунок 13 – Механічна модель тіла Максвелла

Розглядаючи механічну модель, можна переконатися, що вона «тече», як рідина, за рахунок руху елементів амортизатора. Вона володіє пружними властивостями.

Наприклад, при миттєвому прикладанні напружень – миттєво деформується, як пружне тіло, на якусь величину за рахунок деформації пружини. Після пружної миттєвої деформації, при тривалій дії напруження, відзначається в'язка течія. На механічній моделі тіла Максвелла можна відтворити варіант прикладання напруження та фіксації деформацій, які виникли, що зумовить зникнення напруження.

Три стани моделі, зображені на рис. 14, засвідчують, що прикладені напруження згодом зменшуватимуться і потім взагалі зникнуть.

Явище самовільного зменшення напружень при постійній деформації називається **релаксацією напружень**.

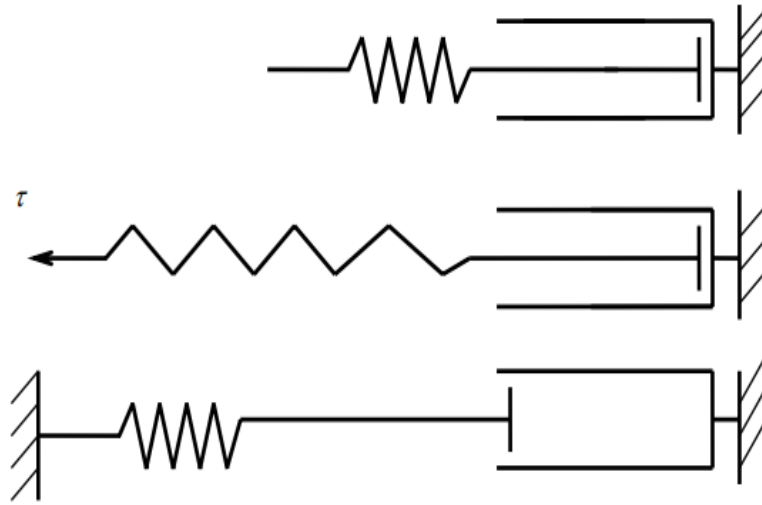


Рисунок 14 – Механічна інтерпретація явища релаксації напружень у тілі Максвелла

Реологічне рівняння тіла Максвелла:

$$\tau + \frac{\mu}{G} \cdot \dot{\tau} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (16)$$

На основі цього рівняння знайдемо рівняння релаксації  $\tau = \tau(t)$ , при  $\dot{\gamma} = \text{const}$ .

Отже,  $\gamma = \gamma_c = \text{const}$ ,  $\dot{\gamma} = 0$ , тоді й рівняння Максвелла матиме такий вигляд:

$$\tau + n \cdot \frac{d\tau}{dt} = 0 \quad (17)$$

де  $n = \frac{\mu}{G}$

Розв'язавши це рівняння, знайдемо рівняння релаксації:

$$\tau = c \cdot e^{-\frac{t}{n}} \quad (18)$$

Для визначення довільної сталої пригадаємо, що в початковий момент прикладають напруження  $\tau = \tau_0$ . Звідки випливає, що  $c = \tau_0$  та має вигляд:

$$t = t_0 \cdot e^{-\frac{t}{n}} = \frac{\tau_0}{e^{\frac{t}{n}}} \quad (19)$$



Випадки 2 і 3, показані на рис. 15, графічно підтверджують релаксацію (самовільне зменшення за експонентою) напружень у часі.

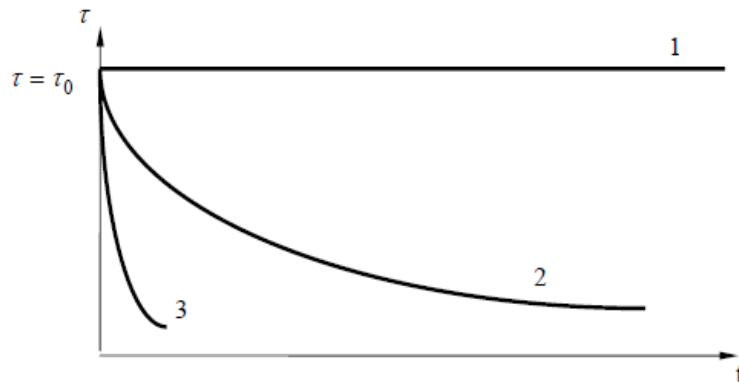


Рисунок 15 – Графік релаксації напружень у тілі Максвелла при різних значеннях  $n$

Коефіцієнт  $n$ , що входить до рівняння тіла Максвелла й має розмірність часу, називається **коефіцієнтом релаксації**.

$$[n] = \frac{[\mu]}{[G]} = \frac{H \cdot c \cdot M^2}{M^2 \cdot H} = c \quad (20)$$

При  $n \rightarrow \infty$  релаксація напружень не відбувається (випадок 1), тоді як при  $n \rightarrow 0$  релаксація напружень відбувається практично миттєво (випадок 3).

Графіки поведінки тіла Максвелла при докладанні постійного напруження (а) і при постійній швидкості зсуву (б) показано на рис. 16.

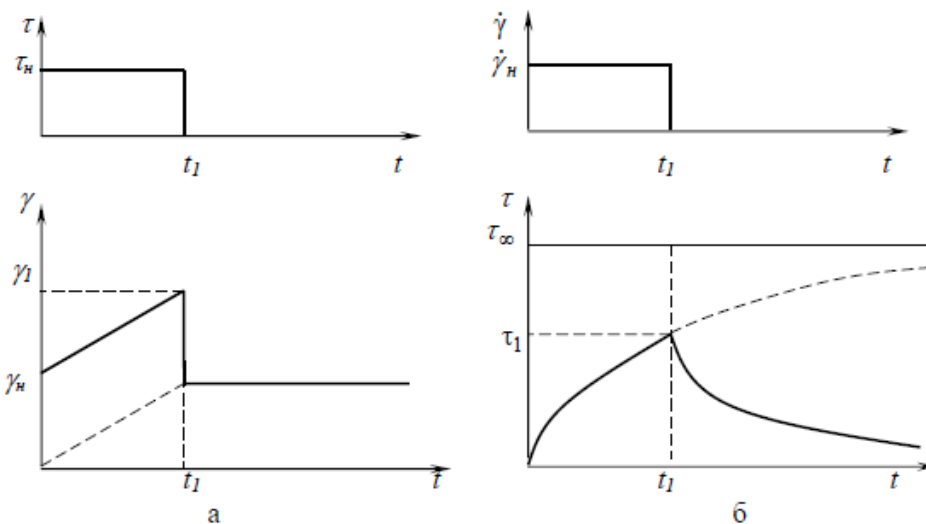


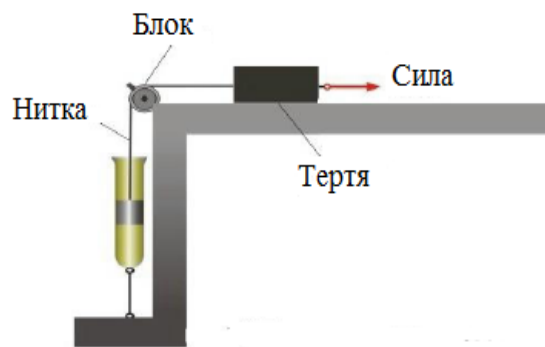
Рисунок 16 – Графіки поведінки тіла Максвелла при дії постійного напруження (а) і постійної швидкості зсуву (б)

### ? Контрольні питання

1. Охарактеризуйте пластичну в'язкість. Як вона позначається?
2. Що являє собою в'язко-пластичне тіло Шведова-Бінгама? Наведіть реологічне рівняння в'язко-пластичного тіла Шведова-Бінгама.

3. Охарактеризуйте механічну модель пружно-пластичного тіла.
4. Охарактеризуйте механічну модель тіла Кельвіна (тіла Фойгта).
5. У якому році Кельвін увів поняття «в'язкість твердого тіла»?
6. Поясніть, з якою метою Кельвін увів тіло Кельвіна до механічної моделі тіла Кельвіна.
7. Розкрийте сутність повзучості.
8. Охарактеризуйте механічну модель тіла Максвелла. Які властивості виявляє в'язка рідина? Які послідовно з'єднані елементи являють собою механічний варіант тіла Максвелла?
9. Як називається явище самовільного зменшення напружень при постійній деформації?
10. Що таке коефіцієнт релаксації? Як він позначається?

### Тести для самоконтролю



1. На рисунку

зображено:

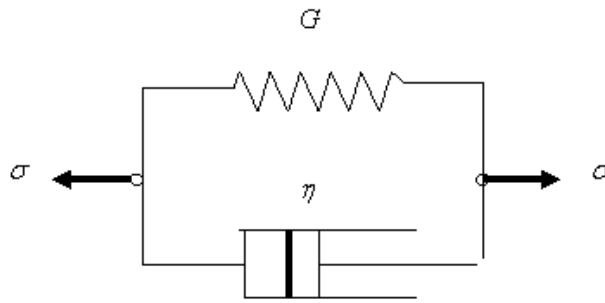
- а) механічну модель в'язко-пластичного тіла Шведова-Бінгама;
- б) механічну модель тіла Максвелла;
- в) механічну модель тіла Кельвіна;
- г) механічну модель твердого тіла Пелега.



2. На рисунку

зображено:

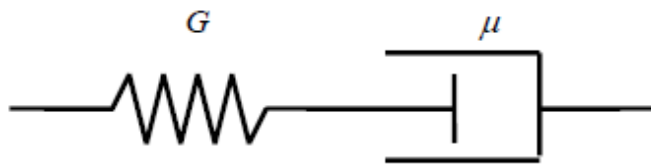
- а) механічну модель пружно-пластичного тіла;
- б) механічну інтерпретацію явища релаксації напружень в тілі Максвелла;
- в) механічну модель твердого тіла Пелега;
- г) механічну модель тіла Кельвіна.



3. На рисунку

зображено:

- а) механічну модель твердого тіла Пелега;
- б) механічну модель тіла Максвелла;
- в) механічну модель тіла Кельвіна;
- г) механічну модель в'язко-пластичного тіла Шведова-Бінгама.



4. На рисунку

зображено:

- а) механічну модель твердого тіла Ренкіна;
- б) механічну модель тіла Максвелла;
- в) механічну модель тіла Кельвіна;
- г) механічну модель твердого тіла Пелега.

5.  $\tau_0$  – це:

- а) межа плинності;
- б) швидкість кутової деформації;
- в) пластична в'язкість;
- г) модуль пружності.

6.  $\mu_{пл.}$  – це:

- а) модуль пружності;
- б) швидкість кутової деформації;
- в) пластична в'язкість;
- г) межа плинності.

7.  $\dot{\gamma}$  – це:

- а) модуль пружності;
- б) швидкість кутової деформації;
- в) пластична в'язкість;
- г) модуль зсуву.

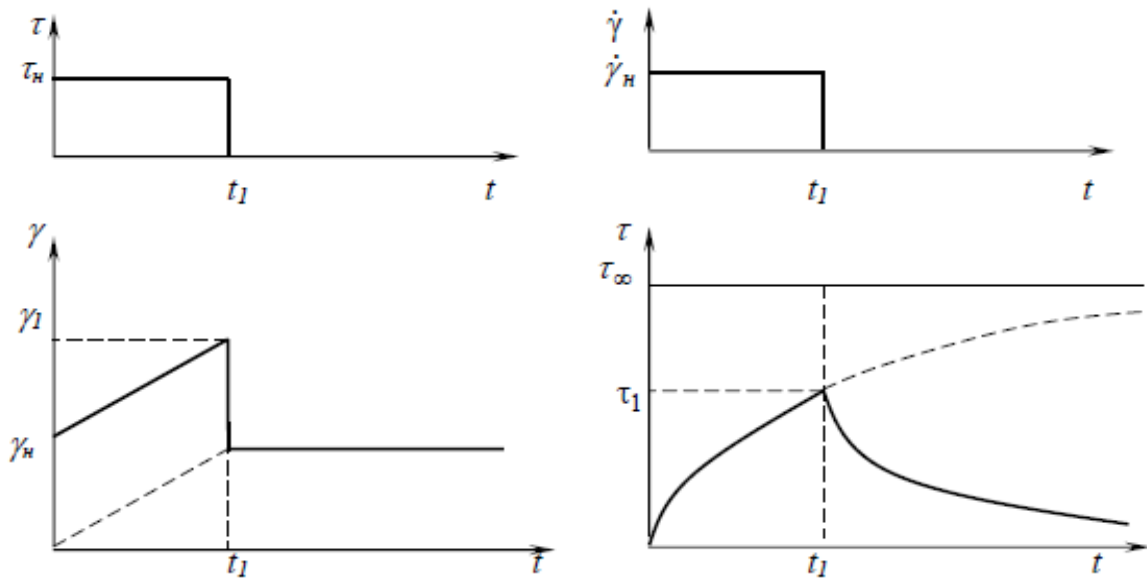
8.  $[n]$  – це:

- а) коефіцієнт релаксації;
- б) швидкість кутової деформації;
- в) пластична в'язкість;
- г) межа плинності.

9.  $\tau + \frac{\mu}{G} \cdot \dot{\tau} = \mu \cdot \dot{\gamma}$  – це:

- а) математична модель тіла Кельвіна;
- б) рівняння тіла Максвелла;
- в) реологічне рівняння елемента Гука;
- г) реологічне рівняння тіла Максвелла.

10. На рисунку



зображено:

- а) графіки релаксації напружень у тілі Максвелла при різних значеннях  $n$ ;
- б) механічну інтерпретацію явища релаксації напружень у тілі Максвелла;
- в) графіки поведінки тіла Максвелла при дії постійного напруження і постійної швидкості зсуву;
- г) залежність ефективної в'язкості від напруження структурованих систем.

**Практичні завдання**

1. Змоделюйте механічну модель в'язко-пластичного тіла Шведова-Бінгама, механічну модель пружно-пластичного тіла та механічну модель тіла Максвелла.
2. Повторіть дослід Гесса з 1,5%-м розчином крохмалю у хімічній посудині та дослід із розчином гліцеролу у воді. Поясніть, що при цьому відбувається.
3. У чому полягають зміни реологічних моделей, що описують поведінку реальних харчових матеріалів?

## Тема 6

### МЕХАНІЧНІ МОДЕЛІ РЕОЛОГІЧНИХ ТІЛ

**Мета:** вивчення механічних моделей реологічних тіл та їх складових елементів; усвідомлення різниці між механічними моделями; засвоєння сутності та значення кривих повзучості.

#### План

- 6.1. Механічна модель тіла Бінгама. Механічна модель тіла Шведова.
- 6.2. Криві повзучості.
- 6.3. Механічна модель стандартного в'язкого пружного тіла Максвелла-Томпсона. Механічна модель тіла Бюргерса.

**Ключові терміни та поняття:** механічна модель тіла Бінгама, механічна модель тіла Шведова, криві повзучості, механічна модель тіла Максвелла-Томпсона, механічна модель тіла Бюргерса.

#### 6.1. Механічна модель Бінгама. Механічна модель Шведова

У природі є матеріали, які в першому наближенні починають «текти», коли напруження зсуву досягне граничного значення. Якщо немає в'язкого опору, то швидкість течії матеріалу стає високою. Це свідчить про те, що такі матеріали можна розглядати як тіла Сен-Венана.

У другому наближенні вони повинні володіти ще й в'язкістю. Це зумовлює побудову тіла Бінгама, що поєднує пружність, в'язкість і пластичність.

**Механічна модель Бінгама** складається з елементів Гука (з модулем пружності  $G$ ), елементів Ньютона (з в'язкістю  $\mu$ ), елементів Сен-Венана (з межею плинності  $\tau_0$ ) (рис. 17).

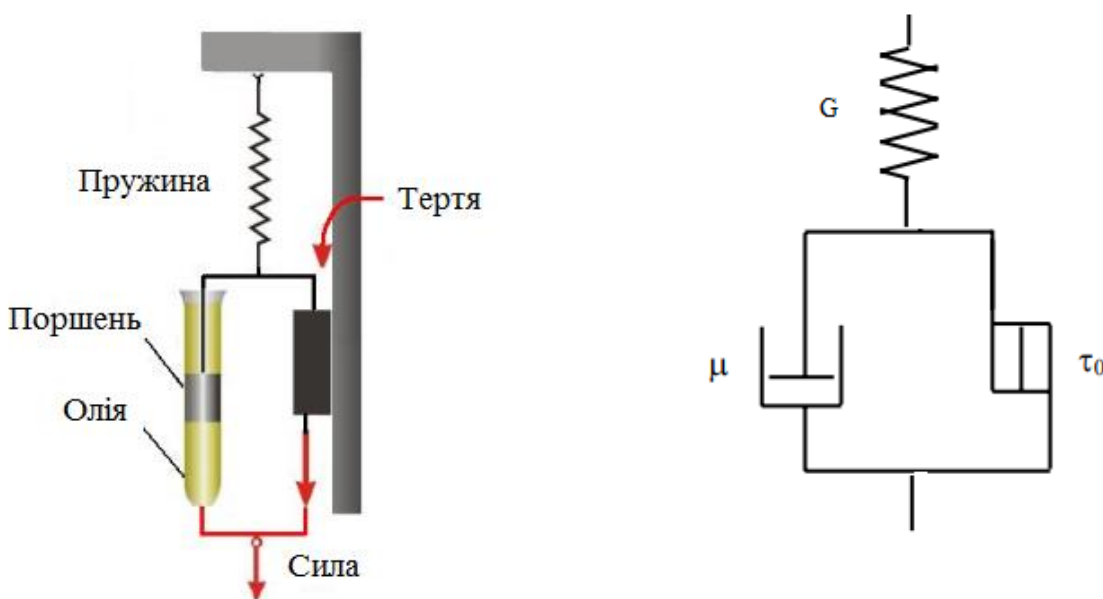


Рисунок 17 – Механічна модель тіла Бінгама

Елементи Ньютона та Сен-Венана з'єднані взаємно паралельно, а разом – послідовно з елементом Гука.

Під дією напруження  $\tau < \tau_0$  модель тіла Бінгама має тільки пружну деформацію.

Реологічне рівняння моделі тіла Бінгама при  $\tau > \tau_0$  має такий вигляд:

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{G} + \frac{(\tau - \tau_0)}{\mu} \quad (21)$$

**Механічна модель тіла Шведова** складається з елемента Гука (з модулем пружності  $G_r$ ), елемента Сен-Венана (з межею плинності  $\tau_0$ ), елемента Максвелла (з модулем пружності  $G_M$  і в'язкістю  $\mu$ ) (рис. 18).

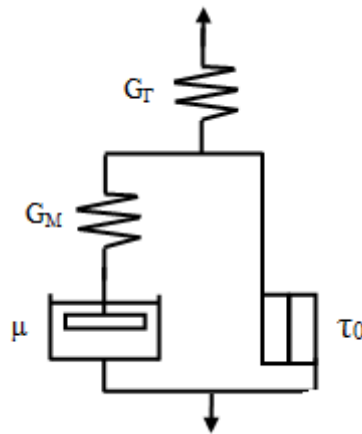


Рисунок 18 – Механічна модель тіла Шведова

Деформація моделі тіла Шведова відбувається тільки завдяки елементу Гука.

При  $\tau \geq \tau_0$  деформуються всі елементи моделі Шведова.

Реологічне рівняння моделі тіла Шведова в диференціальній формі має такий вигляд:

$$\dot{\gamma} = \dot{\tau} \cdot \left( \frac{1}{G_H} + \frac{1}{C_M} \right) + \frac{(\tau - \tau_T)}{\mu} \quad (22)$$

Таким чином, механічна модель Шведова відрізняється від механічної моделі Бінгама тим, що паралельно моделі Сен-Венана-Кулона приєднана модель Максвелла, а в моделі Бінгама – модель Ньютона.

## 6.2. Криві повзучості

Методи фізико-хімічної механіки широко застосовуються в різних галузях виробництва харчових продуктів.

Визначення структурно-механічних властивостей харчових мас пов'язано з необхідністю технологічного контролю виробництва.

Відхилення від затверджених норм можуть позначитися на якості готових виробів і проведенні окремих технологічних процесів.

При діапазонах, що спостерігаються на практиці (зміни швидкості зсуву, температури, тиску) в'язкість харчових матеріалів варіюється в широких межах.

Основним завданням є визначення змін властивостей матеріалу, що відбуваються під впливом тих або інших чинників.

Для встановлення пружно-пластично-в'язких властивостей дисперсних систем харчових продуктів проводять визначення кривих деформації чистого зсуву ( $\epsilon$ ) за певний час ( $t$ ), що отримано при  $\tau = \text{const}$  (рис. 19 а, б).

При  $\tau < \tau_c$  випробування проводять в області пружних оборотних деформацій (рис. 19 а).

При  $\tau > \tau_c$  виникає залишкова деформація, яка після завершення пружної післядії зумовлює сталу течію (рис. 19, б).

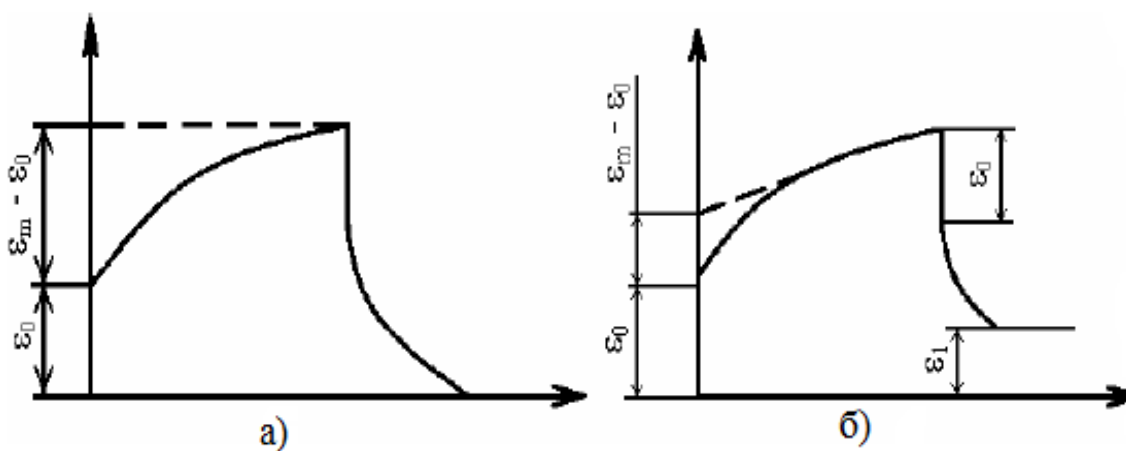


Рисунок 19 – Криві повзучості

Дослідження пружно-пластично-в'язких властивостей дисперсних харчових систем за кривими кінетики деформації проводять переважно за допомогою пластини, що зміщується тангенціально, на приладах типу Вейлера-Рєбіндера або Толстого, а також на ротаційних віскозиметрах Воларовича.

За кривими деформації визначають основні характеристики хлібопекарського тіста, маргарину, кондитерських мас, бісквітного тіста та деяких інших харчових матеріалів.

Найбільш важливим реологічним показником властивостей матеріалу є залежність швидкості деформації від напруження. Для більшості харчових мас ця залежність носить складний характер. У цих випадках реологічні властивості характеризуються кривою залежності швидкості деформації від напруження.

### 6.3. Механічна модель стандартного в'язкого пружного тіла Максвелла-Томпсона. Механічна модель тіла Бюргера

Модель стандартного в'язкого пружного тіла Максвелла-Томпсона являє собою трьохелементну модель, що складається з моделі Кельвіна-Фойгта, до якої послідовно приєднаний пружний елемент Гука (рис. 20).

Закон деформації моделі стандартного в'язкого пружного тіла Максвелла-Томпсона має такий вигляд:

$$\tau + T_p \cdot \dot{\gamma} = G_1 + T_p \cdot G_2 \cdot \dot{\gamma} \quad (23)$$

де  $G$  – тривалий модуль пружності, Па;  
 $G_2$  – миттєвий модуль пружності, Па;  
 $T_p$  – час релаксації, с.

$$T_p = \frac{\mu}{(G_1 + G_2)} \quad (24)$$

$$G = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2}$$

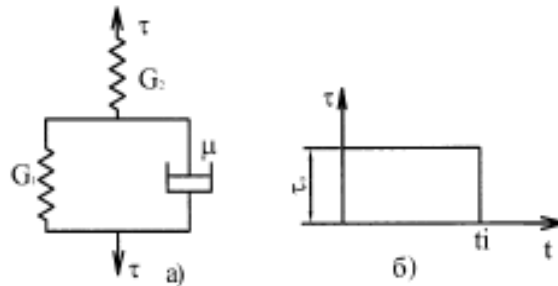


Рисунок 20 – Модель стандартного в'язкого пружного тіла Максвелла-Томпсона

**Модель тіла Бюргерса** складається з послідовно з'єднаних моделей Кельвіна-Фойгта та Максвелла (чотирьохелементна модель) (рис. 21).

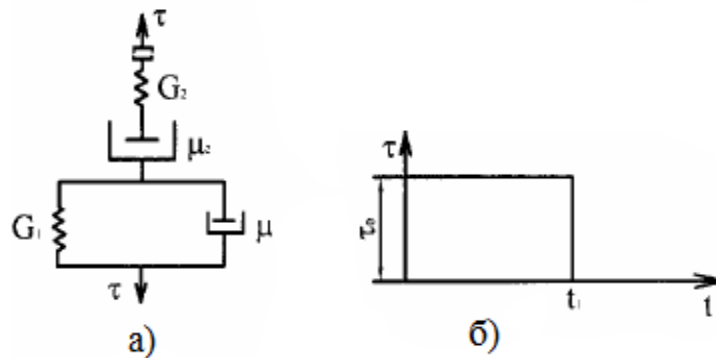


Рисунок 21 – Модель тіла Бюргерса

Рівняння повзучості моделі тіла Бюргерса має такий вигляд:

$$\gamma = \frac{\tau}{G_2} + \frac{\tau}{\mu_2} + \frac{\tau}{G_1} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{-G_1 \cdot t}{\mu_1}} \right] \quad (25)$$

Для більш точного відображення поведінки харчових матеріалів під дією навантаження необхідно створювати складні механічні моделі.

Наприклад, Н.К. Гупта та К.Д. Чойшнер запропонували описувати деформацію свіжого хліба при різанні реологічною моделлю **Шофільда-**



**Скотт-Блера** з елементом, що відображає втрату міцності хліба при зрізі (рис. 22).

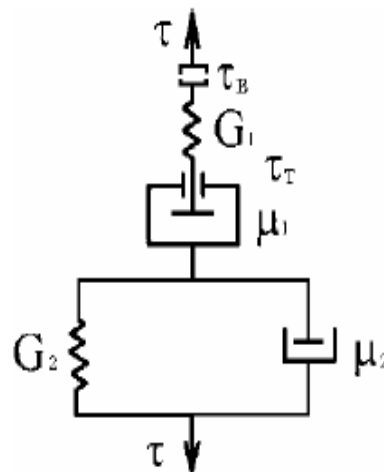


Рисунок 22 – Модель Шофільда-Скотт-Блера

При різанні тиск через ніж передається хлібу, який спочатку зазнає миттєвої еластичної ( $G_1$ ) та сповільненої в'язко-пружної ( $G_2, \mu_2$ ) деформації, а потім при напруженні, що перевищує межу плинності ( $\tau_T$ ), матеріал пластично деформується ( $\tau_T, \mu_1$ ).

При напруженні, що дорівнює межі міцності при зрізі ( $\tau_B$ ), відбувається поділ матеріалу (різання) хлібу.

Реологічне рівняння моделі Шофільда-Скотт-Блера має такий вигляд:

$$\dot{\gamma} = \frac{t}{G_1} + \left( \frac{\tau}{\mu_2} \right) \cdot e^{\frac{-G_2 \cdot t}{\mu_2}} + \frac{(\tau - \tau_T)}{\mu_1} \quad (26)$$

Різання хліба починається при  $\tau > \tau_B$ .

Для невеликої пластичної деформації хліба необхідно, щоб час прикладання навантаження (різання) був якомога меншим, тобто швидкість деформації має забезпечувати стрімке створення максимального напруження на зріз, а пластична деформація повинна бути незначною.

Модель пшеничного тіста при розтягуванні має більш складний вигляд (рис. 23).

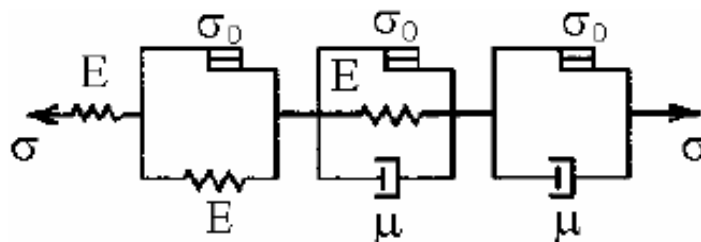
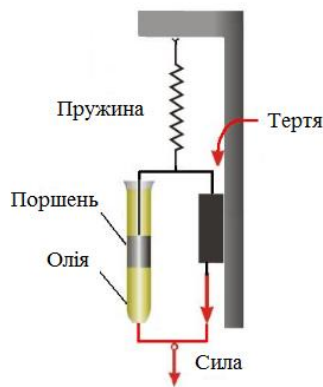


Рисунок 23 – Модель пшеничного тіста при розтягуванні

## ? Контрольні питання

1. Назвіть структурні елементи механічної моделі тіла Бінгама.
2. Як з'єднані елементи Ньютона і Сен-Венана в механічній моделі тіла Бінгама?
3. Назвіть структурні елементи механічної моделі тіла Шведова.
4. Чим відрізняється механічна модель тіла Шведова від механічної моделі тіла Бінгама?
5. Що являє собою модель тіла Максвелла-Томпсона?
6. З яких послідовно з'єднаних моделей складається модель тіла Бюргерса?
7. Поясніть, навіщо потрібно визначати структурно-механічні властивості харчових мас на виробництві.
8. Що визначають за кривими повзучості?
9. Охарактеризуйте процес деформації хліба при різанні.
10. Що потрібно для створення невеликої пластичної деформації хліба?

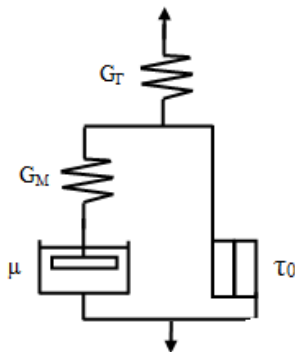
## Тести для самоконтролю



1. На рисунку

зображено:

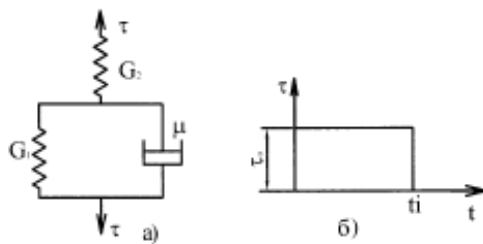
- а) механічну модель тіла Шведова;
- б) модель тіла Максвелла-Томпсона;
- в) механічну модель тіла Бінгама;
- г) модель тіла Бюргерса.



2. На рисунку

зображено:

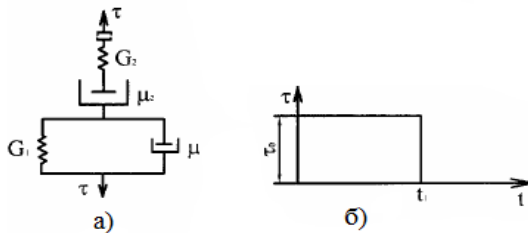
- а) механічну модель тіла Бінгама;
- б) модель тіла Бюргерса;
- в) механічну модель тіла Шведова;
- г) модель тіла Максвелла-Томпсона.



3. На рисунку

зображено:

- а) модель тіла Максвелла-Томпсона;
- б) модель стандартного в'язкого пружного тіла Максвелла-Томпсона;
- в) механічну модель тіла Бінгама;
- г) модель тіла Бюргерса.



4. На рисунку

зображено:

- а) модель тіла Бюргерса;
- б) модель стандартного в'язкого пружного тіла Максвелла-Томпсона;
- в) механічну модель тіла Бінгама;
- г) модель тіла Максвелла-Томпсона.

### Практичні завдання

1. Змодельуйте механічну модель тіла Бінгама, механічну модель тіла Шведова, модель стандартного в'язкого пружного тіла Максвелла-Томпсона та модель тіла Бюргерса.
2. Відтворіть модель Шофільда-Скотт-Блера та модель пшеничного тіста при розтягуванні.


## Тема 7

### РЕОЛОГІЧНІ РІВНЯННЯ ТЕЧІЇ

**Мета:** вивчення систем реальних рідин; з'ясування сутності течії матеріалу та засвоєння рівнянь, що її описують; ознайомлення із кривими течії матеріалів.

#### План

- 7.1. Системи реальних рідин.
- 7.2. Течія матеріалу та рівняння, що її описують.
- 7.3. Криві течії псевдопластичних матеріалів.
- 7.4. Криві течії матеріалів: дилатантна течія, бінгамівська течія; течія Балклі-Гершеля; тиксотропна течія; антитиксотропна течія; реопексна течія.

 **Ключові терміни та поняття:** неньютонівська рідина (аномальна рідина), псевдопластична течія, рівняння псевдопластики, апроксимація, турбулентний плин, дилатантна течія, бінгамівська течія; течія Балклі-Гершеля; тиксотропна течія; антитиксотропна течія; реопексна течія, пластична течія, ідеально пластична течія, неідеально пластична течія, тиксотропія, крива гістерезису, антитиксотропні матеріали, реопексія, в'язко-пружні рідини.

### 7.1. Системи реальних рідин

У.Л. Уїлкінсон запропонував розподілити реальні рідини на **3 групи систем:**

1. Системи, для яких швидкість зсуву в кожній точці являє собою деяку функцію тільки напруження в тій самій точці. До цієї групи належать неньютонівські рідини (неньютонівські матеріали), течія яких не залежить від часу.

**Неньютонівська рідина (аномальна рідина)** – модель рідини, що є суцільним рідким тілом, для якого дотичні напруження внутрішнього тертя, що спричинене відносним зсувом шарів рідини, описуються нелінійною залежністю від градієнта швидкості в напрямку, перпендикулярному до напрямку зсуву. Для неньютонівських рідин характерна залежність параметра в'язкості від градієнта швидкості.

2. Системи, в яких зв'язок між напруженням і швидкістю зсуву залежить від часу дії напруження або від передісторії рідини (тиксотропні та реопектичні рідини).

3. Системи, що володіють властивостями як пружного твердого тіла, так і рідини; частково проявляють пружне відновлення форми після припинення напруження (в'язко-пружні рідини).

### 7.2. Течія матеріалу та рівняння, що її описують

Течія матеріалу залежить від його фізико-хімічних характеристик: від форми та розташування молекул, концентрації, температури, вологості, утворення міцел.

Додаванням інгредієнтів до чистого розчинника, тобто з підвищенням концентрації, можна збільшити в'язкість речовини. Високомолекулярні речовини в розчині зумовлюють із підвищенням напруження зниження в'язкості. Таку течію називають **псевдопластичною**. *Наприклад*, до псевдопластичних рідин належать різні харчові продукти.

Більшість неньютонівських рідин (або матеріалів) не мають межі плинності (гранично напруженого зсуву), а криві течії мають лінійну залежність між напруженням і швидкістю зсуву тільки при дуже низьких (в'язкість  $\mu_0$ ) і дуже високих (в'язкість  $\mu_\infty$ ) значеннях швидкості.

Для опису течії псевдопластичних матеріалів використовують такі рівняння:

– рівняння Оствальда де Віля:

$$\tau = \kappa \cdot \dot{\gamma}^n \quad (27)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт консистенції, що залежить як від природи матеріалу, так і від виду та розмірів вимірювальної апаратури;  
 $n$  – індекс течії;

– рівняння Штейгера:

$$\tau = \frac{\dot{\gamma}}{C + A \cdot \tau^2} \quad (28)$$

– рівняння Елліса:

$$\tau = \mu_0 \cdot \dot{\gamma} + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (29)$$

– рівняння Рейнера-Філіппова:

$$\tau = \left[ \mu_\infty + \mu_0 - \frac{\mu_\infty}{\left(1 + \left(\frac{\tau}{A}\right)^2\right)} \right] \cdot \dot{\gamma} \quad (30)$$

– рівняння Прандтля-Ейрінга:

$$\tau = A \cdot \arcsin\left(\frac{\dot{\gamma}}{B}\right) \quad (31)$$

– рівняння Ейрінга:

$$\tau = \frac{\dot{\gamma}}{B} + C \cdot \sin\left(\frac{\tau}{A}\right) \quad (32)$$

– рівняння Уїльямса:

$$\tau = \frac{A \cdot \dot{\gamma}}{B + \dot{\gamma}} + \mu_\infty \cdot \dot{\gamma} \quad (33)$$

– рівняння Сіско:

$$\tau = A \cdot \dot{\gamma} + B \cdot \dot{\gamma}^n \quad (34)$$

– рівняння Хавена:

$$\tau = \frac{\mu_0 \cdot \dot{\gamma}}{1 + C \cdot \tau^n} \quad (35)$$

де  $A, B, C$  – коефіцієнти.

### 7.3. Криві течії псевдопластичних матеріалів

Для опису течії різних харчових матеріалів найчастіше використовують рівняння Оствальда де Віля (див. рівняння 27).

При  $n < 1$  рівняння 27 відповідає кривій, наведеній на рис. 24 а.

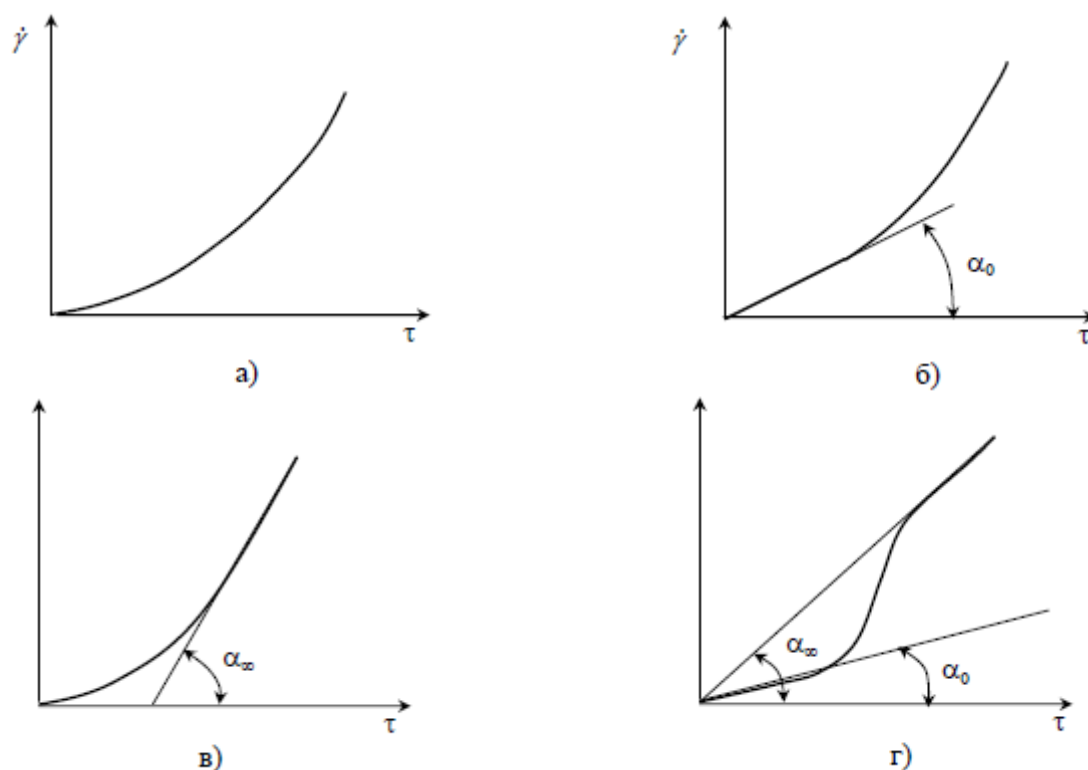


Рисунок 24 – Криві течії псевдопластичних матеріалів:

а – крива течії матеріалу, якщо  $n < 1$  в рівнянні Оствальда де Віля;

б – крива течії матеріалу, якщо  $C > 0$ ,  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  в рівнянні Штейгера, гранична початкова в'язкість  $\mu_0 = \frac{1}{C}$ ;

в – крива течії матеріалу, якщо  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$  в рівнянні Рейнера-Філіппова; г – крива течії матеріалу, якщо існує пропорційність між  $\dot{\gamma}$  і  $\tau$  при дуже високих швидкостях зсуву;  $\alpha_0$  – кут нахилу дотичної до кривої

У логарифмічних координатах залежність  $\tau$  від  $\dot{\gamma}$  для багатьох неньютонівських рідин (або матеріалів) часто стає лінійною в досить широкому діапазоні швидкостей зсуву. Саме цим пояснюється широке використання рівняння Оствальда де Віля.

При  $\dot{\gamma} = 0$ , а отже, при  $\alpha_0 = 0$ , в'язкість стає нескінченно високою. Однак практично визначають кінцеве значення цієї в'язкості. При  $n = 1$  закон зводиться до виразу Ньютона.

Коефіцієнт  $K$  більш чутливий, порівняно з  $n$ , до зміни температури матеріалу, що особливо важливо для харчових середовищ. Константи рівняння Оствальда де Віля справедливі тільки для певного діапазону швидкостей зсуву.

Наприклад, з рівняння 27 Оствальда де Віля видно, що для псевдопластичних матеріалів при  $n < 1$  в'язкість зменшується з підвищенням швидкості зсуву.

Така реологічна властивість пояснюється тим, що в нерухомому середовищі розташування частинок характеризується хаотичністю, а під дією сил, які наростають, відбувається все більша їх орієнтація в напрямку течії. З підвищенням швидкості взаємодія між частинками зменшується.

В інженерній практиці рівняння 27 Оствальда де Віля при  $n < 1$  часто називають **рівнянням псевдопластики**.

Водночас рівняння 27 Оствальда де Віля має певні **недоліки**: відсутність фізичного сенсу формули при граничних значеннях швидкості зсуву ( $\dot{\gamma} = 0$  і  $\dot{\gamma} = \infty$ ); при лінійній апроксимації в логарифмічних координатах сильно нелінійних кривих течії у значення констант вносяться значні похибки, що знижує точність реологічних розрахунків.

**Апроксимація** (лат. *approximate* – наближати) – наближене вираження одних математичних об'єктів іншими, близькими за значенням, але простішими (наприклад, кривих ліній – ламаними, ірраціональних чисел – раціональними, неперервних функцій – многочленами).

Використання рівнянь 27-35 пов'язано з труднощами вимірювання граничних значень реологічних параметрів.

Крива течії (рис. 24 б) описується рівнянням 28 (рівняння Штейгера); при  $C > 0$  та при  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ , гранична початкова в'язкість  $\mu_0 = \frac{1}{C}$ .

Деякі псевдопластичні матеріали (або речовини) на реограмі дають викривлення при низьких швидкостях зсуву (рис. 24 в); ці речовини не можна відносити до пластичних. Визначити в'язкість  $\mu_\infty$  (при  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ) можна лише приблизно, оскільки при високих швидкостях неминуче відбувається виділення тепла та виникнення турбулентного плину.

**Турбулентний плин** – це рух, при якому умовні шари рідини здатні перемішуватися в потоці та утворювати вихори (виникнення турбулентності).

Трапляються і такі псевдопластичні речовини, в яких пропорційність між  $\dot{\gamma}$  і  $\tau$  спостерігається тільки при дуже високих швидкостях зсуву (рис. 24 г).

#### **7.4. Криві течії матеріалів: дилатантна течія, бінгамівська течія; течія Балклі-Гершеля; тиксотропна течія; антитиксотропна течія; реопексна течія**

Дилатантну течію проявляють речовини, в яких зі збільшенням напруження (швидкості зсуву) непропорційно підвищується в'язкість (рис. 25 а).

При  $n > 1$  дилатантну течію описують рівнянням 27 Оствальда де Віля. При підвищеному напруженні в'язкість може стати нескінченно високою, що призведе до руйнування речовини.

Дилатантні матеріали на практиці трапляються значно рідше, ніж псевдопластичні. Прикладами таких харчових матеріалів можуть слугувати згущене молоко, деякі розчини кукурудзяного борошна, цукру, крохмалю.

У дисперсних системах залежно від концентрації, а також величини навантаження може виникнути течія, що покаже відхилення від напруженого стану.

При значеннях напруження, нижчих від граничних, дисперсна система поводить себе як тверде тіло, що пружно деформується. Якщо напруження, що діє на систему, перевищує граничні значення, то має місце **пластична течія**.

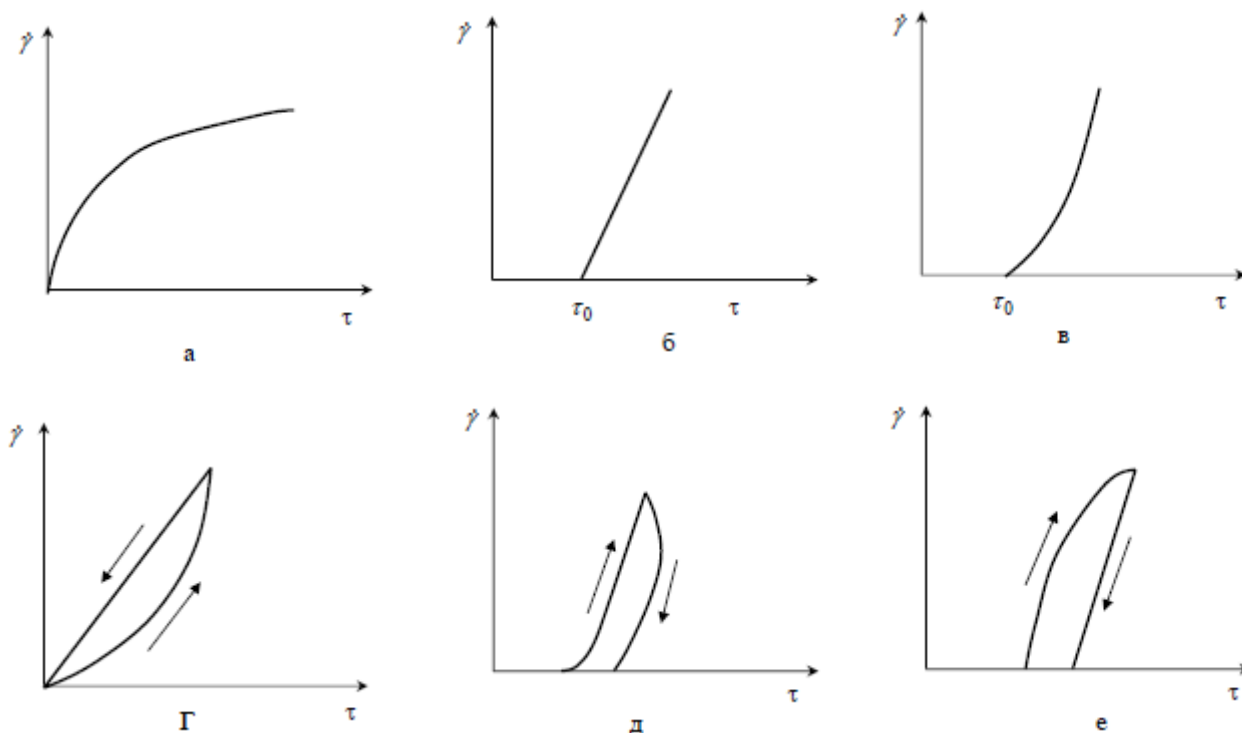


Рисунок 25 – Криві течії матеріалів: а – дилатантна течія; б – бінгамівська течія; в – течія Балклі-Гершеля; г – тиксотропна течія; д – антитиксотропна течія; е – реопексна течія

Для опису течії пластичних матеріалів використовують такі рівняння:

– рівняння Бінгама:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{пл} \cdot \dot{\gamma} \quad (36)$$

де  $\tau_0$  – максимальне напруження зсуву (межа плинності), Па;

$\mu_{пл}$  – пластична в'язкість, Па · с

– рівняння Балклі-Гершеля:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (37)$$

– рівняння Кассона:



$$\tau^{\frac{1}{2}} = \tau_K^{\frac{1}{2}} + (\mu_K \cdot \dot{\gamma})^{\frac{1}{2}} \quad (38)$$

де  $T_K$  – граничне напруження за Кассоном, Па;

$\mu_K$  – пластична в'язкість за Кассоном, Па·с

– рівняння Шульмана:

$$\tau^m = \tau_0^m + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (39)$$

**Ідеально пластична течія** – течія, при якій після перевищення межі течії (межі плинності) спостерігається пропорційність між швидкістю та напруженням зсуву.

При  $\tau > \tau_0$  структура повністю руйнується, матеріал відчуває зсувну течію (рис. 25 б). Для характеристики цього різновиду течії Бінгам запропонував рівняння 36.

Реальні матеріали не зовсім точно виявляють пластичні властивості, відповідні моделі Бінгама. Проте ці відхилення настільки незначні, що модель можна використовувати при розрахунку процесів течії деяких харчових мас.

*Наприклад*, до харчових продуктів і сировини, до яких можна застосувати рівняння Бінгама, належать маргарин, шоколадні суміші, сиркові-сирні та пралинові маси.

Криві течії деяких харчових матеріалів (наприклад, маса для цукерок) описують за допомогою рівняння 37 Балклі-Гершеля (рис. 25 в), що включає в себе граничне напруження зсуву та степеневий закон.

**Неідеально пластична течія** – пластична течія, при якій спостерігається непропорційна залежність між швидкістю зсуву та напруженням.

При досягненні межі плинності структура руйнується не відразу, а поступово, в міру зростання градієнта швидкості. Для такого різновиду течії Кассон вивів рівняння 38.

Для деяких пластичних матеріалів рівняння 38 Кассона з експонентою  $\frac{1}{2}$  не узгоджується з результатами, отриманими на практиці. Тому для розрахунків доводиться підставляти експоненти від  $\frac{1}{3}$  до  $\frac{2}{3}$  (експонента рівняння Бінгама дорівнює 1).

Кассон припускав, що за рахунок сил взаємодії між частинками дисперсної фази утворюються довгі ланцюги у вигляді ниток, які при низьких швидкостях зсуву рухаються як одне ціле. У міру зростання швидкості відбувається розрив ниток на дрібні частинки, а при дуже високих швидкостях зсуву – їх повне руйнування; в'язкість залежить тільки від взаємодії продуктів між окремими частинками.

*Наприклад*, до харчових продуктів і сировини, до яких можна застосувати рівняння Кассона, належать розплавлений шоколад, вершкове масло, вафельне тісто, згущене молоко.

Якщо зміни в'язкості пов'язані не тільки зі швидкістю, але і з часом, то говорять про тиксотропію, антитиксотропію або реопексію. Умовою цього є перехід гель-золь.

**Тиксотропія** – здатність до довільного оборотного відновлення структури після її механічного руйнування.

**Тиксотропія** (грец. *thixis* – дотик + *trope* – зміна) – явище ізотермічного оборотного переходу золь ↔ гель; для високомолекулярних речовин – здатність розплавів і концентрованих розчинів високомолекулярних речовин до ізотермічних оборотних процесів розрідження – згущення під дією деформацій. Тиксотропія є характерною властивістю коагуляційних структур, тобто просторових сіток.

Матеріал вважається тиксотропним, коли його в'язкість є функцією часу. При цьому передбачається, що структура після певного періоду спокою повертається до початкового стану.

Час тиксотропного руйнування, так само як і відновлення, для різних структур змінюється в дуже широких межах. Тиксотропію можна визначити за реограмою при отриманні **кривої гістерезису**.

На рис. 25 г показано різновид петлі гістерезису, що побудована за результатами одного експерименту, протягом якого швидкість зсуву зростає від нуля до максимального значення, а потім миттєво знижується до нуля (на рисунку вказано стрілкою).

Для одного і того ж матеріалу вид петлі буде різним при різному часі дослідження.

*Наприклад*, до тиксотропних харчових матеріалів можна віднести: тісто для виготовлення бубликів, пралінові та трюфельні цукеркові маси, какао терте, м'ясний фарш.

Матеріали, стан течії яких у часі є протилежним тому, який дають тиксотропні системи, називаються **антитиксотропними** (рис. 25 д). Петлі гістерезису для антитиксотропних матеріалів можна отримати так само, як і для тиксотропних.

Матеріали, структура яких у часі зміцнюється, мають *реопексні* властивості (рис. 25 е).

**Реопексія** – властивість окремих неньютонівських рідин, яка полягає в тому, що зі збільшенням напруження зсуву в рідині з плином часу зростає її в'язкість. Явище, зворотне тиксотропії.

*Наприклад*, реопексні рідини поведуть себе так само, як і деякі мастильні матеріали: густішають і навіть тверднуть при перемішуванні.

При розрахунку технологічних процесів тиксотропні властивості матеріалів і харчових середовищ, що переробляються, враховують у момент пуску обладнання після тривалого простою, а реопексні – після інтенсивного зсуву.

Придатність того чи іншого реологічного рівняння для опису течії реального матеріалу перевіряється експериментально для діапазону

швидкостей зсуву, який має включати швидкості, відповідні процесу переробки матеріалу.

Велика група харчових матеріалів належить до так званих **в'язко-пружних рідин**, які виявляють як в'язкі, так і пружні властивості.

Якщо в гуківському пружному тілі напруження, що відповідає певній деформації, не залежить від часу, то у в'язко-пружному тілі напруження поступово знижується.

Окрім того, в'язко-пружні матеріали течуть подібно до чистих в'язких рідин, але їх деформація при знятті напруження частково відновлюється.

*Наприклад*, до в'язко-пружних рідин належать борошняне тісто, цукеркові маси.

В'язко-пружний ефект проявляється в «розбуханні» (збільшенні поперечних розмірів) джгутів тіста, цукеркових мас при виході із формувальних отворів пресів макаронного та цукеркового виробництва. Це є результатом часткового відновлення матеріалу внаслідок пружної післядії.

### **? Контрольні питання**

1. Назвіть групи систем реальних рідин, запропоновані У.Л. Уїлкінсоном.

2. Що таке неньютонівська рідина (аномальна рідина)? Яка залежність характерна для неньютонівських рідин?

3. Поясніть, від чого залежить течія матеріалу.

4. Що таке псевдопластична рідина?

5. Які рівняння використовують для опису течії псевдопластичних матеріалів?

6. Яке рівняння використовують для опису течії харчових матеріалів?

7. Як позначається кут нахилу дотичної до кривої?

8. Що таке рівняння псевдопластики?

9. Перерахуйте недоліки рівняння Оствальда де Віля.

10. Поясніть сутність апроксимації.

11. Чи можливе визначення в'язкості  $\mu_{\infty}$  при виникненні турбулентного плинину?

12. Що являє собою турбулентний плин?

13. Наведіть приклади дилатантних матеріалів.

14. Що таке пластична течія?

15. Які рівняння використовують для опису течії пластичних матеріалів?

16. Що таке ідеально пластична течія? Що таке неідеально пластична течія? У чому полягає відмінність між ними?

17. Поясніть сутність тиксотропії.

18. Як називаються матеріали, стан течії яких у часі є протилежним тому, який дають тиксотропні системи?

19. Поясніть сутність реопексії.

20. Наведіть приклади в'язко-пружних рідин.

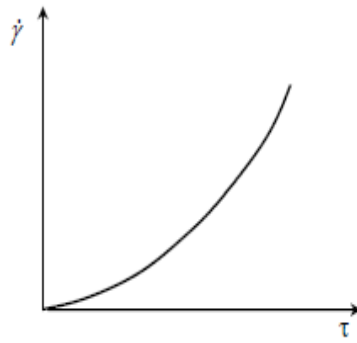
## Тести для самоконтролю

1. Додаванням інгредієнтів до чистого розчинника можна збільшити в'язкість речовини. Високомолекулярні речовини в розчині зумовлюють з підвищенням напруження зниження в'язкості. Така течія називається...

- а) пластичною;
- б) бінгамівською;
- в) псевдопластичною;
- г) тиксотропною.

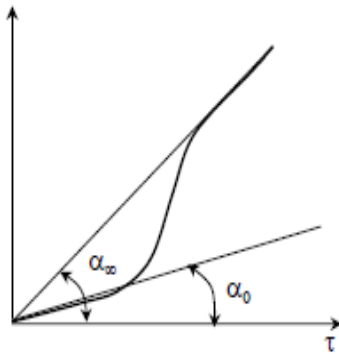
2. Формула рівняння  $\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n$  відповідає:

- а) рівнянню Елліса;
- б) рівнянню Бінгама;
- в) рівнянню Штейгера;
- г) рівнянню Оствальда де Віля.



3. На рисунку зображено:

- а) криву течії матеріалу, якщо  $C > 0$ ,  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  в рівнянні Штейгера, гранична початкова в'язкість  $\mu_0 = \frac{1}{C}$ ;
- б) криву течії матеріалу, якщо  $n < 1$  в рівнянні Оствальда де Віля;
- в) криву течії матеріалу, якщо  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$  в рівнянні Рейнера-Філіппова;
- г) криву течії матеріалу, якщо існує пропорційність між  $\dot{\gamma}$  і  $\tau$  при дуже високих швидкостях зсуву.



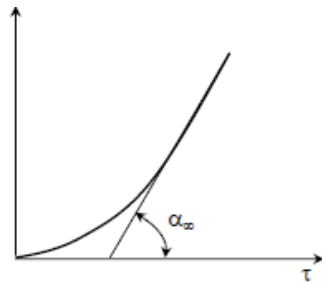
4. На рисунку зображено:

- а) криву течії матеріалу, якщо існує пропорційність між  $\dot{\gamma}$  і  $\tau$  при дуже високих швидкостях зсуву;
- б) криву течії матеріалу, якщо  $n < 1$  в рівнянні Оствальда де Віля;

в) криву течії матеріалу, якщо  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$  в рівнянні Рейнера-Філіппова;

г) криву течії матеріалу, якщо  $C > 0$ ,  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  в рівнянні Штейгера, гранична

початкова в'язкість  $\mu_0 = \frac{1}{C}$ .



5. На рисунку  $\tau$  зображено:

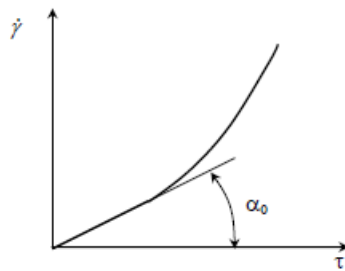
а) криву течії матеріалу, якщо  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$  в рівнянні Рейнера-Філіппова;

б) криву течії матеріалу, якщо  $n < 1$  в рівнянні Оствальда де Віля;

в) криву течії матеріалу, якщо  $C > 0$ ,  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  в рівнянні Штейгера, гранична

початкова в'язкість  $\mu_0 = \frac{1}{C}$ ;

г) криву течії матеріалу, якщо існує пропорційність між  $\dot{\gamma}$  і  $\tau$  при дуже високих швидкостях зсуву.



6. На рисунку  $\dot{\gamma}$  зображено:

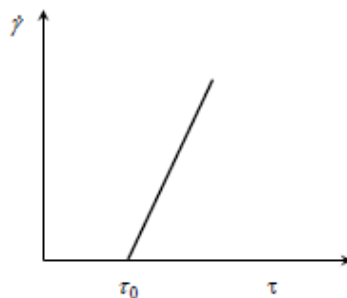
а) криву течії матеріалу, якщо  $n < 1$  в рівнянні Оствальда де Віля;

б) криву течії матеріалу, якщо  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$  в рівнянні Рейнера-Філіппова;

в) криву течії матеріалу, якщо існує пропорційність між  $\dot{\gamma}$  і  $\tau$  при дуже високих швидкостях зсуву;

г) криву течії матеріалу, якщо  $C > 0$ ,  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$  в рівнянні Штейгера, гранична

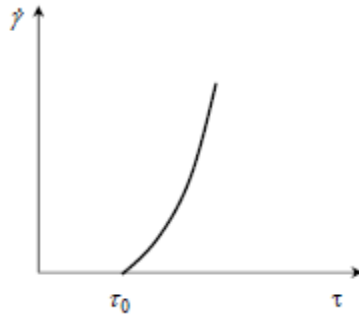
початкова в'язкість  $\mu_0 = \frac{1}{C}$ .



7. На рисунку  $\tau_0$  зображено:

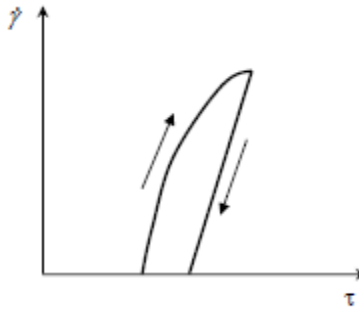
а) дилатантну течію;

- б) реопексну течію;
- в) тиксотропну течію;
- г) бінгамівську течію.



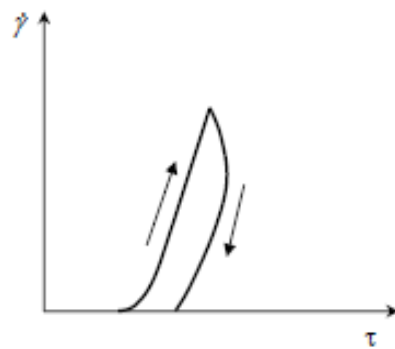
8. На рисунку зображено:

- а) дилатантну течію;
- б) течію Балклі-Гершеля;
- в) тиксотропну течію;
- г) бінгамівську течію.



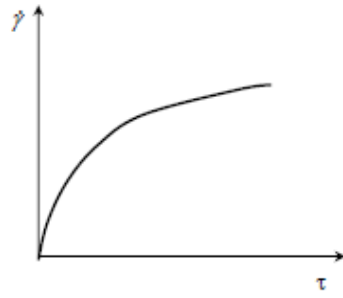
9. На рисунку зображено:

- а) реопексну течію;
- б) дилатантну течію;
- в) бінгамівську течію;
- г) тиксотропну течію.



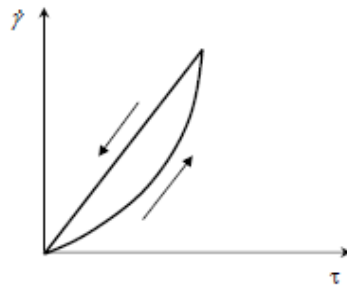
10. На рисунку зображено:

- а) дилатантну течію;
- б) реопексну течію;
- в) антитиксотропну течію;
- г) бінгамівську течію.



11. На рисунку зображено:

- а) антитиксотропну течію;
- б) реопексну течію;
- в) дилатантну течію;
- г) бінгамівську течію.



12. На рисунку зображено:

- а) антитиксотропну течію;
- б) реопексну течію;
- в) дилатантну течію;
- г) бінгамівську течію.

### Практичне завдання

1. До яких харчових матеріалів належать: згущене молоко, деякі розчини кукурудзяного борошна, цукру, крохмалю, маргарин, шоколадні суміші, сиркові-сирні та пралінові маси, розплавлений шоколад, вершкове масло, вафельне тісто, пралінові та трюфельні цукеркові маси, какао терте, м'ясний фарш? Вибір обґрунтуйте.

### Тема 8

## ПОВЗУЧІСТЬ ХАРЧОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ДІЄЮ ОСЬОВОГО СТИСНЕННЯ

**Мета:** засвоєння сутності повзучості харчових матеріалів під дією осьового стиснення; ознайомлення з особливостями деформаційних процесів, із деформаційною поведінкою харчових мас при всебічному стисненні та моделлю, що її описує.

### План

8.1. Повзучість харчових матеріалів в умовах усебічного осьового стиснення.

**Ключові терміни та поняття:** миттєва пружна деформація, запізніла пружна деформація, пластична деформація, всебічний тиск, модуль миттєвої пружної об'ємної деформації, модуль запізнілої пружної об'ємної деформації, об'ємна в'язкість, об'ємна в'язкість пружної післядії, період релаксації.

### 8.1. Повзучість харчових матеріалів в умовах усебічного осьового стиснення

При виготовленні виробів харчової промисловості багато технологічних операцій здійснюються при надмірному тиску. Цим пояснюється необхідність вивчення фізико-механічних властивостей харчових мас в умовах усебічного стиснення. Під дією всебічного стиснення в матеріалі виникають відносні об'ємні деформації:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H} \quad (40)$$

де  $V$  – початковий об'єм матеріалу,  $\text{м}^3$ ;  
 $\Delta V$  – зміна об'єму,  $\text{м}^3$ ;  
 $H$  – висота шару матеріалу,  $\text{м}$ ;  
 $\Delta H$  – зміна висоти шару матеріалу,  $\text{м}$ .

Деформаційні процеси, що відбуваються з матеріалом в умовах об'ємного стиснення аналогічні процесам при зсуві.

Деформаційну поведінку харчових мас при об'ємному стисненні можна описати за допомогою чотирьохелементної моделі, для якої загальна деформація розраховується за формулою:

$$\varepsilon = \varepsilon_{v1} + \varepsilon_{v2} + \varepsilon_{v3} = \frac{p}{E_{v1}} + \frac{p}{E_{v2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{p}{\eta_{v1}} \cdot t_H \quad (41)$$

де  $\varepsilon_{v1}$  – миттєва пружна деформація;  
 $\varepsilon_{v2}$  – запізніла пружна деформація;  
 $\varepsilon_{v3}$  – пластична деформація;  
 $p$  – усебічний тиск,  $\text{Па}$ ;  
 $E_{v1}$  – модуль миттєвої пружної об'ємної деформації,  $\text{Па}$ ;  
 $E_{v2}$  – модуль запізнілої пружної об'ємної деформації,  $\text{Па}$ ;  
 $\eta_{v1}$  – об'ємна в'язкість,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  
 $\eta_{v2}$  – об'ємна в'язкість пружної післядії,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;  
 $T$  – період релаксації,  $\text{с}$ ;  
 $t_H$  – час релаксації.

Фізико-механічні постійні матеріалу визначають на основі експериментальних досліджень матеріалу на повзучість – деформація матеріалу при постійному напруженні.

Типову криву повзучості при всебічному стисненні подано на рис. 26. Відрізок  $OA$  характеризує миттєву пружну деформацію, модуль якої можна розрахувати за формулою 41.



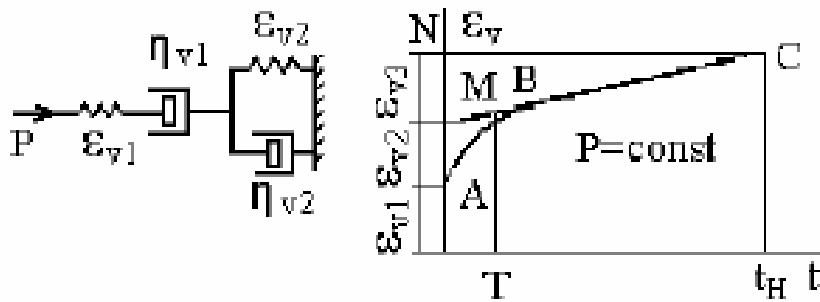


Рисунок 26 – Типова крива повзучості харчового матеріалу при всебічному стисненні

На ділянці АВ відбувається запізнена та пластична деформації, параметри якої можна визначити за формулою:

$$\varepsilon_{v2} = \frac{P}{E_{v2}} \quad (42)$$

Період релаксації  $T$  визначається графічно як абсциса точки перетину дотичної до кривої в точці  $A$  і прямої, що є продовженням ділянки в'язкої течії  $BC$ .

Другу в'язкість пружної післядії обчислюють за формулою:

$$\eta_{v2} = \varepsilon_{v2} \cdot T \quad (43)$$

Об'ємну в'язкість розраховують за формулою:

$$\eta_{v1} = \frac{P}{E_{v3}} \cdot t_H \quad (44)$$

Особливий інтерес становить вивчення повзучості при осьовому стисненні. Такий вид деформації спостерігається, наприклад, під час нанесення рисунка при заготівлі тіста при виробництві печива. Процеси всебічного й осьового стиснення мають багато спільного.

У зв'язку з цим наведений вище опис процесу деформації справедливий і для осьового стиснення.

Наприклад, рівняння 41 при осьовому стисненні набуває такого вигляду:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_1} \cdot t \quad (45)$$

де  $\sigma$  – напруження при стисненні зразка; визначається відношенням навантаження до площі поперечного перерізу зразка харчового матеріалу.

На відміну від усебічного стиснення повзучість при осьовому стисненні можна досліджувати лише для таких матеріалів, які здатні зберігати форму (тобто не деформуються) під дією сил тяжіння.

## Контрольні питання

1. Поясніть особливості вивчення повзучості харчових матеріалів в умовах усебічного осьового стиснення.

2. За допомогою якої моделі вивчають деформаційну поведінку харчових мас при об'ємному стисненні? Наведіть відповідну формулу.

### Тести для самоконтролю

1. Відносні об'ємні деформації розраховують за формулою:

а)  $\varepsilon_{V2} = \frac{P}{\varepsilon_{V2}}$ ;

б)  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_1} \cdot t$ ;

в)  $\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H}$ ;

г)  $\varepsilon = \varepsilon_{V1} + \varepsilon_{V2} + \varepsilon_{V3} = \frac{P}{E_{V1}} + \frac{P}{E_{V2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{P}{\eta_{V1}} \cdot t_H$ .

2. Загальна деформація розраховується за формулою:

а)  $\varepsilon_{V2} = \frac{P}{\varepsilon_{V2}}$ ;

б)  $\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H}$ ;

в)  $\varepsilon = \varepsilon_{V1} + \varepsilon_{V2} + \varepsilon_{V3} = \frac{P}{E_{V1}} + \frac{P}{E_{V2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{P}{\eta_{V1}} \cdot t_H$ ;

г)  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_1} \cdot t$ .

3. При осьовому стисненні загальна деформація розраховується за формулою:

а)  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_1} \cdot t$ ;

б)  $\varepsilon = \varepsilon_{V1} + \varepsilon_{V2} + \varepsilon_{V3} = \frac{P}{E_{V1}} + \frac{P}{E_{V2}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{P}{\eta_{V1}} \cdot t_H$ ;

в)  $\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H}$ ;

г)  $\varepsilon_{V2} = \frac{P}{\varepsilon_{V2}}$ .

### Практичне завдання

1. Створіть модель для вивчення повзучості харчових матеріалів в умовах усебічного осьового стиснення. Наведіть приклади харчової сировини та продуктів для цієї моделі.

## Тема 9

### ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ХАРЧОВИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета:** засвоєння особливостей визначення фізико-механічних характеристик харчових матеріалів із досліду на повзучість; ознайомлення з кінематичними схемами приладів Д.М. Толстого та Вейлера-Ребіндера.

#### План

9.1. Визначення фізико-механічних характеристик харчових матеріалів із досліду на повзучість.

**Ключові терміни та поняття:** повзучість, криві повзучості, час релаксації, прилад Толстого, прилад Вейлера-Ребіндера.

#### 9.1. Визначення фізико-механічних характеристик харчових матеріалів із досліду на повзучість

Реальні харчові матеріали мають миттєві пружні, запізнілі пружні та залишкові деформації.

Найпростішою моделлю, за допомогою якої можна описати поведінку харчових матеріалів (наприклад, тіста, цукеркових мас), є модель, що складається з послідовно з'єднаних 2-х двоелементних моделей (рис. 27). Розвиток деформації в часі для реальних матеріалів при постійному напруженні називається *повзучістю*, а графіки залежності деформації від часу – *кривими повзучості*.

При миттєвому прикладанні напруження  $\tau$  при  $t = 0$  виникає миттєва пружна деформація  $\gamma_1 = \frac{\tau}{G_1}$  (рис. 27, відрізок ОА). Подальший її розвиток відбувається по кривій АВ. На цій ділянці одночасно розвиваються запізніла пружна деформація  $\gamma_2 = \frac{\tau}{G_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{G_2}{\mu_2} \cdot t}\right)$  та деформація в'язкої течії  $\gamma_3 = \frac{\tau}{\mu_1} \cdot t$ .

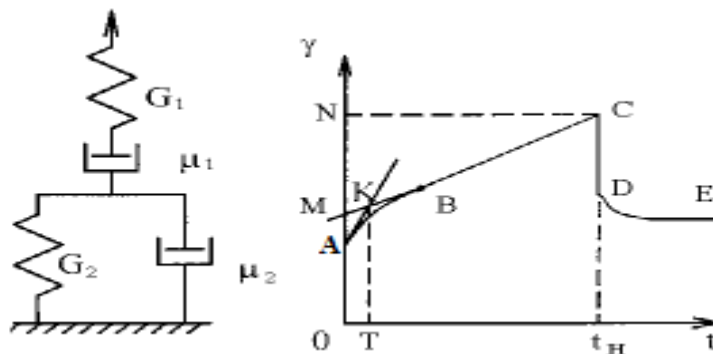


Рисунок 27 – Механічна модель і крива повзучості харчового матеріалу

Через певний час встановлюється прямолінійна залежність (рис. 26, ділянка ВС), що відповідає усталеному стаціонарному процесу незворотної в'язкої течії при постійному значенні пружної деформації.

На ділянці ВС деформація наростає з постійною швидкістю, що характеризується тангенсом кута нахилу прямої ВС до осі абсцис.

Швидкість течії пропорційна напруженню  $\tau$  і обернено пропорційна в'язкості  $\mu$ .

При  $t = t_H$  напруження знімають, при цьому зникає миттєва пружна деформація  $\varepsilon_{v1}$  (відрізок СД = ОА), а потім монотонно спадає запізніла пружна деформація  $\varepsilon_{v2}$ .

Зі збільшенням  $t$  крива ДЕ асимптотично наближається до кінцевого значення деформації, що дорівнює залишковій деформації в'язкої течії або пластичній деформації  $\varepsilon_{v3}$ .

Таким чином, у період дії постійного напруження  $\tau$  при  $0 < t < t_H$  загальна деформація визначається за такою формулою:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{G_2}{\mu_2} t}\right) + \frac{\tau}{\mu_1} \cdot t \quad (46)$$

де  $G_1$  – модуль миттєвої пружної деформації;

$G_2$  – модуль запізнілої пружної деформації;

$\mu_1$  – в'язкість матеріалу;

$\mu_2$  – в'язкість пружної післядії.

За період навантаження  $t = t_H$  загальна деформація  $\varepsilon$  згідно з рис. 27 відповідає відрізку ON, пружна деформація – відрізку ОА, деформація в'язкої течії  $G_3$  – відрізку MN, де точка М виходить при перетині відрізка ВС з віссю  $\gamma$ , деформація – відрізку АМ.

Характеристики  $G_1$  і  $\mu_1$  визначають з урахуванням формули 46 за такими формулами:

$$G_1 = \frac{\tau}{\gamma_1} \quad (47)$$

$$\mu_1 = \frac{\tau \cdot t_H}{\gamma_2} \quad (48)$$

Враховуючи, що запізніла пружна деформація  $\gamma_2$  практично повністю завершується в точці В, модуль  $G_2$  можна визначити за формулою:

$$G_2 = \frac{\tau}{\gamma_2} \quad (49)$$

В'язкість пружної післядії  $\mu_2$  визначають таким чином. Відношення  $\frac{\mu_2}{G_2}$  має фізичний сенс часу, протягом якого деформація  $\gamma_2$  досягає 63 % від максимального значення – це **час релаксації T**.

Величина T визначається абсцисою точки перетину дотичної до кривої повзучості в точці A із прямою MBC.

Рівняння дотичної в точці A має вигляд:

$$\gamma = \gamma_1 + \left( \frac{\tau}{G_2 \cdot T} + \frac{\tau}{\mu_1} \right) \cdot t \quad (50)$$

Рівняння прямої MBC має вигляд:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \frac{\tau}{\mu_1} \cdot t \quad (51)$$

Прирівнявши вирази (50) і (51), отримаємо абсцису точки перетину  $t = T$ :

$$\mu_2 = G_2 \cdot T \quad (52)$$

З метою підвищення точності визначення фізико-механічних характеристик до уваги беруть кілька кривих повзучості при різному напруженні. Це дає можливість, *по-перше*, перевірити лінійність залежностей миттєвої пружної деформації, запізнілої пружної деформації та швидкості деформації в'язкої течії від напруження зсуву; *по-друге*, графічно визначити характеристики матеріалу за результатами декількох паралельних випробувань.

Прикладом використання характеристик матеріалу є розрахунок процесу нанесення рисунка на тісто. Для збереження рисунка необхідно, щоб матеріал тістової заготовки мав залишкові деформації, що істотно перевищують пружні.

Знаючи напруження, що діє в харчовому матеріалі при нанесенні штампа, а також його фізико-механічні характеристики, можна обчислити тривалість силового впливу на заготовку тіста.

Найпростішим видом випробування матеріалу на повзучість є зрушення між двома паралельними пластинами.

Схему пристрою для отримання кривої повзучості харчових матеріалів рифлених пластин подано на рис. 28.

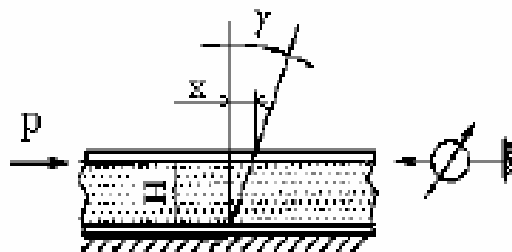


Рисунок 28 – Схема пристрою для отримання кривої повзучості харчових матеріалів рифлених пластин

Зразок матеріалу заповнює простір між горизонтальними пластинами (прилад Д.М. Толстого) (рис. 29).

Поверхня пластин має бути рифленою для запобігання ковзання матеріалу по пластині. Площа пластини –  $F$ , зазор між пластинами –  $H$ .

Нижня пластина нерухома, а верхня пов'язана з індикатором годинникового типу.

Якщо до верхньої пластини прикласти навантаження  $P$  у горизонтальному напрямку, то на поверхні пластини виникнуть дотичні напруження  $\tau$ , що врівноважують прикладене навантаження, тобто  $\tau = \frac{P}{F}$ .

Під дією напруження матеріал деформується, і верхня пластина отримує зміщення  $X$ , що реєструється індикатором годинникового типу.

Деформація зсуву визначається відношенням зміщення до зазору:  $\varepsilon = \frac{X}{H}$ . Спостерігаючи за розвитком деформації в часі, отримуємо криві повзучості досліджуваного матеріалу.

Для проведення досліджень можна використати пристрій у вигляді рифленої пластини, поміщеної в посудину з паралельними стінками.

До пластини прикладається навантаження, що витягує її з досліджуваного матеріалу (прилад Вейлера-Ребіндера) (рис. 30). При цьому в шарі маси, що знаходиться між пластиною і стінками посудини, виникають напруження зсуву.

На рис. 28 подано кінематичну схему приладу Д.М. Толстого, призначеного для вивчення повзучості при зсуві.

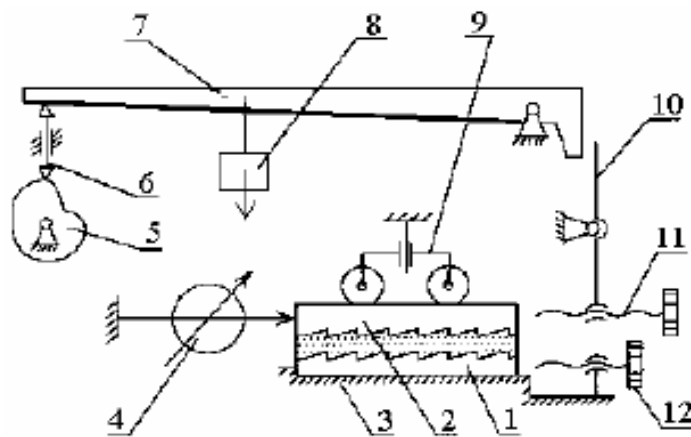


Рисунок 29 – Кінематична схема приладу Д.М. Толстого

Прилад складається з двох рифлених пластин (1 і 2), між якими міститься досліджувана маса, навантажувального пристрою, що складається з важелів 7, 10 і вантажу 8, обмежувача 9 та індикатора годинного типу 4. Для закріплення нижньої пластини 1 у гнізді 3 призначений гвинт 12.

Обмежувач 9 необхідний для забезпечення строго горизонтального переміщення верхньої пластини в процесі випробувань, кулачок 5 і упор 6 слугують для прикладання навантаження до верхньої пластини. Для ліквідації люфтів у важільному механізмі передбачений гвинт 11 проміжного важеля 10.

На рис. 30 подано схему приладу Вейлера-Ребіндера.

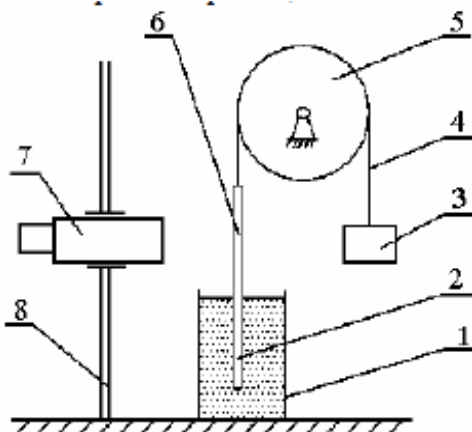


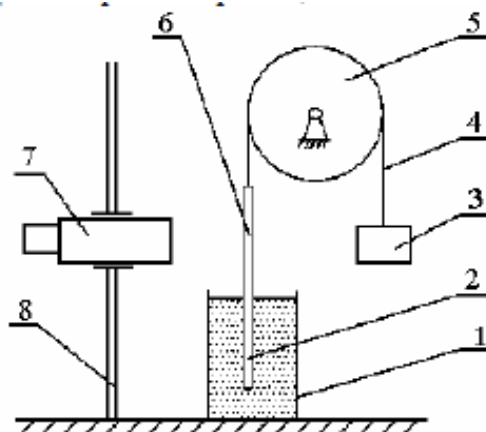
Рисунок 30 – Кінематична схема приладу Вейлера-Ребіндера

Прилад Вейлера-Ребіндера складається з посудини з паралельними стінками 1, рифленої пластини 2 із хвостовиком, навантажувального пристрою, що являє собою вантаж 3, підвішений на нитці 4, перекинутій через блок 5, вимірювального мікроскопа 7, закріпленого на штативі 8. Для вимірювання переміщень на хвостовику пластини нанесено риски, які знаходяться в полі зору мікроскопа, що вимірює показники. Ціна поділу шкали мікроскопа – 0,1 мм.

### ? Контрольні питання

1. Розкрийте особливості визначення фізико-механічних характеристик харчових матеріалів із досліду на повзучість.
2. Дайте визначення поняття «повзучість».
3. Що являють собою криві повзучості?
4. Що таке час релаксації?
5. Охарактеризуйте будову приладу Д.М. Толстого.
6. Охарактеризуйте будову приладу Вейлера-Ребіндера.

### Тести для самоконтролю

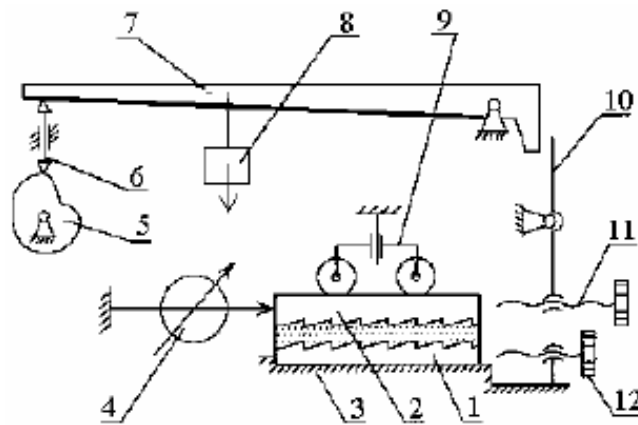


1. На рисунку

- а) пластометр;
- б) прилад Д.М. Толстого;

зображено:

- в) прилад Вейлера-Ребіндера;
- г) пенетрометр.



2. На рисунку

зображено:

- а) прилад Вейлера-Ребіндера;
- б) прилад Д.М. Толстого;
- в) пластометр;
- г) пенетрометр.

### Практичні завдання

1. Складіть коротку інструкцію та укажіть принцип роботи приладу Д.М. Толстого.
2. Складіть коротку інструкцію та укажіть принцип роботи приладу Вейлера-Ребіндера.



## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

### *Основна:*

1. Авроров В.А. Основы реологии пищевых продуктов в вопросах и ответах. Основные понятия. Проблемы. Задачи. Методы. Москва, 2015. 132 с.
2. Авроров В.А., Тутов Н.Д. Основы реологии пищевых продуктов. Москва, 2016. 267 с.
3. Арет В.А., Николоев Б.Л., Николаев Л.К. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции. Санкт-Петербург, 2009. 296 с.
4. Арет В.А., Руднев С.Д. Реология и физико-механические свойства пищевых продуктов. Санкт-Петербург : ИЦ ИнтерМедия, 2014. 246 с.
5. Косой В.Д., Дунченко Н.К., Меркулов М.Ю. Реология молочных продуктов. Москва : ДеЛи принт, 2010. 186 с.
6. Максимов А.С., Черных В.Я. Реология пищевых продуктов : лабораторный практикум. Москва, 2006. 176 с.
7. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Москва, 2007. 560 с.
8. Реологічні методи дослідження сировини і харчових продуктів та автоматизація розрахунків реологічних характеристик : навчальний посібник / А.Б. Горальчук, П.П. Пивоваров, О.О. Гринченко та ін. Харків : Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі, 2006. 63 с.
9. Черевко А.И., Михайлов В.М., Маяк В.И. Реология в процессах производства пищевых продуктов: учеб. пособие: в 2 ч. Ч. 1. Классификация и характеристика неньютоновских жидкостей. Харк. гос. ун-т питания и торговли. Харьков, 2012. 180 с.
10. Черевко О.І., Михайлов В.М., Маяк В.І., Маяк О.А. Реологія в процесах виробництва харчових продуктів : навч. посібник : у 2 ч. Ч. 1. Класифікація та характеристика неньютонівських рідин. Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. Харків : ХДУХТ, 2014. 244 с.

### *Додаткова:*

1. Андрианов Е.И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов. Москва, 1982. 256 с.
2. Арет В.А., Забровский Г.П., Николаев Б.Л., Николаев Л.К. Инженерная реология жиросодержащих продуктов. Санкт-Петербург, 2002. 294 с.
3. Горбатов А.В. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов. Москва : Легкая промышленность, 1982. 296 с.
4. Косой В.Д., Малышев А.Д., Юдина С.Б. Инженерная реология в производстве колбас. Москва : КолосС, 2005. 240 с.
5. Мачихин Ю.А. Реометрия пищевого сырья и продуктов. Москва : Агропромиздат, 1990. 267 с.
6. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. Москва : Легкая пищевая промышленность, 1981. 216 с.

### *Інформаційні ресурси:*

1. Банк книг – полная электронная библиотека книг, постоянные обновления. URL: <http://bankknig.net>
2. Гуць В.С., Коваль О.А. Метод аналізу реологічних моделей в'язко-пружно-пластичних матеріалів у пакувальних процесах. *Упаковка*. 2013. № 4. С. 46-49. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upakovka\\_2013\\_4\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upakovka_2013_4_15)
3. Левіт І.Б., Сукманов В.О., Афенченко Д.С. Реологічні характеристики як відображення технологічних та споживчих властивостей м'ясо-молочних напівфабрикатів. *Вісник Донецького національного університету економіки і торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського*. Сер. : Технічні науки. 2014. № 1. С. 112-126. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuett\\_2014\\_1\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnuett_2014_1_15)
4. Реология в производстве пищевых продуктов. URL: <https://helpiks.org/3-37992.html>

### **ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА**

1. Ковальська С.І. Реологія харчових мас : курс лекцій. Київ : НУХТ, 2010. 34 с.
2. Кузнецов О.А, Волошин Е.В., Сагитов Р.Ф. Реология пищевых масс : учебное пособие. Оренбург : ГОУ ОГУ, 2005. 106 с.
3. Омелянчик Л.О., Гаврилова Л.О., Лашко Н.П., Карпенко Ю.В. Реологія харчової сировини та продуктів : навчально-методичний посібник до виконання контрольних робіт і самопідготовки студентів біологічного факультету напряму «Хімія» денної форм навчання. Запоріжжя : ЗНУ, 2014. 89 с. URL: [https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/191418/mod\\_resource/content/1/%D0%A0%D0%B5%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%8F.pdf](https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/191418/mod_resource/content/1/%D0%A0%D0%B5%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D1%96%D1%8F.pdf)
4. Пирогов А.Н., Доня Д.В. Инженерная реология : учебное пособие. Кемерово, 2004. 110 с.
5. Фармацевтична енциклопедія / голова ред. ради та автор передмови В.П. Черних; Нац. фармац. ун-т України. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : МОРІОН, 2010. 1632 с. URL: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/>

Навчальне видання  
(українською мовою)

**Генчева Вікторія Іванівна**

**Лашко Наталія Петрівна**

**Бражко Олександр Анатолійович**

## **РЕОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ ТА ПРОДУКТІВ**

Навчальний посібник  
для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра  
спеціальності «Хімія»  
освітньо-професійної програми «Хімія»

Рецензент *І.Б. Лабенська*

Відповідальний за випуск *О.А. Бражко*

Коректор *В.І. Генчева*