

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 кожну 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, драгли, 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) **рідіноподібні 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.

Релаксація – це зменшення напруження з часом.

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). τ

Напруження зсуву τ (Па) розраховують за формулою:

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

де P – сила;

F – площа верхньої або нижньої пластини, м.

Швидкість зсуву $\dot{\gamma}$ (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.

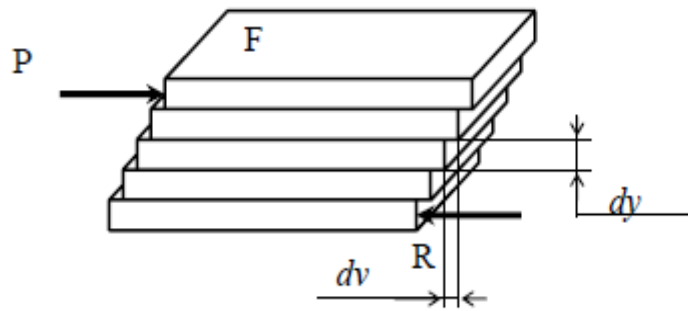


Рисунок 3 – Зсув матеріалу між двома пластинами в'язко-деформуючого матеріалу

Для ньютонівських матеріалів напруження зсуву τ пропорційне в'язкості μ (Па · с) та швидкості зсуву $\dot{\gamma}$ (с⁻¹):

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

де μ – в'язкість, Па · с;
 $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, 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 μ , 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 μ , 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 ν (м²/с):

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

де μ – в'язкість, Па · с;
 ρ – щільність середовища, кг/м³.

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** (μ_{ef}).

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

Тобто у ньютонівської ідеальної в'язкості рідини коефіцієнт в'язкості постійний, а в реальних харчових рідин коефіцієнт ефективною в'язкості (μ_{ef}) 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).

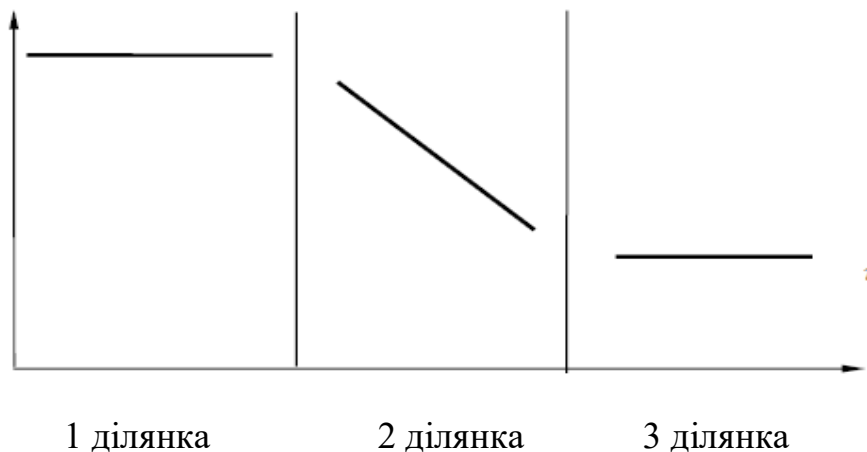


Рисунок 4 – Залежність ефективною в'язкості від напруження структурованих систем

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 (μ_{ef}), що носить ньютонівський характер;

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

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

? 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.

Практичне завдання

1. Напишіть основні формули для розрахунку:
 - напруження зсуву;
 - швидкості зсуву;
 - кінематичної та ефективної в'язкості.
2. **Ньютоновська та неньютоновська рідина. Наведіть приклади.**
3. **Опишіть методику вивчення плинності.**