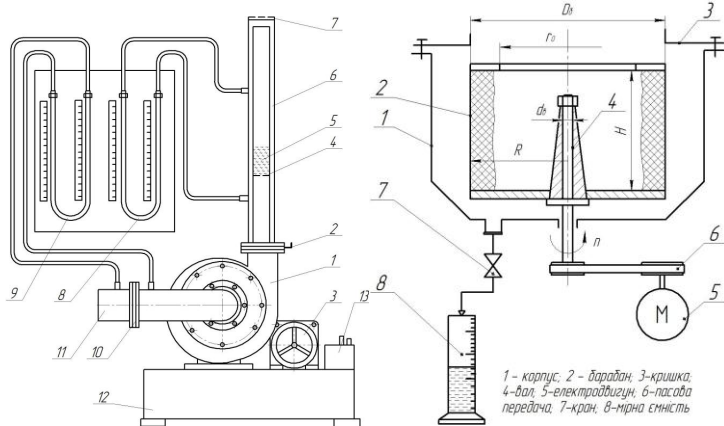


**ЯЛПАЧИК В.Ф., ЯЛПАЧИК Ф.Ю., БОЙКО В.С.,  
БУДЕНКО С.Ф., ВЕРХОЛАНЦЕВА В.О., ЦИБ В.Г.**



## **ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ДИСЦИПЛІНИ „ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ“**



Мелітополь  
Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні  
2017

УДК 664.002.5(076)  
ББК 36.81-5я7  
Л 12

*Розглянуто і рекомендовано до друку Вченою Радою Таврійського  
державного агротехнологічного університету.  
Протокол № 10 від 28 березня 2017 року*

**Автори:**

**В.Ф. Ялпачик**, доктор технічних наук, професор кафедри Обладнання переробних та харчових виробництв Таврійського державного агротехнологічного університету

**Ф.Ю. Ялпачик**, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри Обладнання переробних та харчових виробництв Таврійського державного агротехнологічного університету

**В.С. Бойко**, кандидат технічних наук, доцент кафедри Обладнання переробних та харчових виробництв Таврійського державного агротехнологічного університету

**С.Ф. Буденко**, кандидат технічних наук, доцент кафедри Обладнання переробних та харчових виробництв Таврійського державного агротехнологічного університету

**В.О. Верхоланцева**, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри Обладнання переробних та харчових виробництв Таврійського державного агротехнологічного університету

**В.Г. Циб**, старший викладач кафедри Обладнання переробних та харчових виробництв Таврійського державного агротехнологічного університету

**Рецензенти:**

**Ю.О. Чурсінов**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Технологія переробки та зберігання продукції сільського господарства Дніпропетровського державного аграрного університету

**Б.В. Орловський**, заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Машини легкої промисловості Київського національного університету технологій та дизайну.

**В.Ф. Ялпачик, Ф.Ю. Ялпачик, В.С. Бойко, С.Ф. Буденко, В.О. Верхоланцева, В.Г. Циб.** Лабораторний практикум з дисципліни „Процеси і апарати“: Навчальний посібник. - Мелітополь: Видавничий будинок Мелітопольської міської друкарні, 2017. - 275 с.

ISBN

Практикум рекомендований для студентів навчальних закладів III і IV рівня акредитації для використання у навчальному процесі підготовки з дисципліни „Процеси і апарати“.

ISBN

**УДК 664.002.5(076)**

**ББК 36.81-5я7**

© Ялпачик В.Ф., Ялпачик Ф.Ю., Бойко В.С.,  
Буденко С.Ф., Верхоланцева В.О., Циб В.Г.  
Таврійський державний агротехнологічний  
університет, 2017

## ЗМІСТ

Загальні організаційно-методичні передумови.....	5
Загальна інструкція з охорони праці.....	7
Лабораторна робота	
Визначення параметрів процесу подрібнення на молоткових дробарках.....	8
Лабораторна робота	
Ситовий аналіз матеріалу, подрібненого на молотковій дробарці...	19
Лабораторна робота	
Експериментальне визначення моменту інерції та приведеної довжини молотків дробарки.....	31
Лабораторна робота	
Вивчення складного руху моделі молотка дробарки.....	43
Лабораторна робота	
Оцінка якості подрібнення сировини при виробництві соків.....	55
Лабораторна робота	
Експериментальне визначення параметрів процесу пресування на плунжерному гідравлічному пресі.....	69
Лабораторна робота	
Дослідження процесу розділення неоднорідних систем на тарілчастому сепараторі.....	80
Лабораторна робота	
Дослідження процесу розділення неоднорідних систем методом відцентрового фільтрування.....	95
Лабораторна робота	
Дослідження процесу перемішування рідкого середовища механічною лопатевою мішалкою.....	105
Лабораторна робота	
Дослідження динаміки процесу псевдозрідження зернистих матеріалів.....	120

Лабораторна робота Дослідження коефіцієнта тертя харчових продуктів до і після заморожування .....	134
Лабораторна робота Дослідження розподілу температури в плодах при заморожуванні і дефростації.....	151
Лабораторна робота Дослідження змінення фізико-механічних властивостей плодів і овочів до та після заморожування.....	166
Лабораторна робота Експериментальне дослідження виробництва льоду за допомогою льодогенератора.....	176
Лабораторна робота Визначення теплових параметрів процесу виробництва пончиків на апараті АП-ЗМ.....	192
Лабораторна робота Дослідження процесу насичення води вуглекислим газом на абсорбційній установці.....	205
Лабораторна робота Експериментальне дослідження процесу конвективного сушіння харчових матеріалів .....	224
Лабораторна робота Експериментальне дослідження процесу вакуумного сушіння овочів і фруктів.....	239
Лабораторна робота Дослідження процесу простої перегонки бінарних сумішей .....	250
Лабораторна робота Дослідження адгезійних властивостей матеріалів методом тензометрування.....	265

## ЗАГАЛЬНІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-МЕТОДИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ

Основною метою проведення робіт, наведених у даному посібнику, є закріплення теоретичних знань, поглиблення і конкретизація уявлень про процеси і апарати переробних та харчових виробництв, придбання навичок виконання налагоджувальних операцій.

Включені в даний посібник роботи висвітлюють досвід організації лабораторних робіт на кафедрі „Обладнання переробних і харчових виробництв“ Таврійського державного агротехнологічного університету (ТДАТУ, м. Мелітополь), відповідають тематиці робіт і переліку обладнання, що рекомендується навчальною програмою підготовки з навчальної дисципліни „Процеси і апарати“.

У лабораторних роботах, наведених у посібнику, витримується єдина структура: мета і завдання роботи, загальні відомості за темою роботи, оснащення робочого місця, вимоги техніки безпеки, методики досліджень, які виконують студенти, обробка результатів та зміст звіту. У кожній роботі передбачені контрольні питання та тестовий контроль.

Метою посібника є викладення загальних теоретичних відомостей до кожної роботи, що дозволить поглиблено використовувати його при підготовці до лабораторних робіт та підсумкового іспиту за завершенням курсу. Посібник може бути корисним для слухачів факультетів підвищення кваліфікації, студентів заочної форми навчання, а також фахівців інженерно-технічної служби переробних та харчових виробництв.

Виконання лабораторних робіт дозволяється тільки після того як студент ознайомиться з загальною інструкцією та особливими вимогами з техніки безпеки на відповідному робочому місці.

Заздалегідь, разом з майстром виробничого навчання (лаборантом) викладач перевіряє оснащення робочих місць у лабораторії.

Комплект документів включає у себе методичні вказівки, необхідну літературу, плакати, опис робочого місця, правила техніки безпеки.

Перед кожною лабораторною роботою викладач в усній бесіді визначає теоретичну підготовленість до виконання даної роботи.

Викладач знайомить студентів з інструкцією з техніки безпеки; у кожній ланці (бригаді) студентів призначає відповідального за дотримання порядку, підтримання чистоти, зберігання засобів оснащення і інструменту на робочому місці.

При виконанні робіт студент повинен керуватися алгоритмом:

- уяснити мету роботи, проробити теоретичний розділ;
- усвідомити будову і склад основного лабораторного обладнання, розглянути відповідні нормативні та довідкові документи, призначені для виконання лабораторної роботи;
- виконати (при необхідності) попередні розрахунки за темою роботи, сформувані вихідні дані на проведення експерименту;
- налаштувати лабораторну установку та допоміжні контрольно-вимірювальні прилади;
- провести експериментальну частину роботи та обробити одержані результати дослідів;
- прибрати робоче місце, привести обладнання і комплект інструменту у вихідний стан, здати робоче місце лаборантові (учбовому майстру);
- оформити звіт з лабораторної роботи і пред'явити його викладачеві.

Під час занять викладач контролює самостійне виконання лабораторної роботи, дає пояснення на запитання.

Звітність з виконання роботи включає оформлення студентом письмового звіту, співбесіду з викладачем та виконання тестового контролю.

Типовий звіт з роботи, крім деяких особливих вимог, включає:

- тему і мету роботи;
- опис оснащення лабораторної роботи натурними зразками, пристосуваннями, оснасткою, інструментом;
- послідовність проведення експериментальної частини роботи (у відповідності до її вмісту – операції, виміри, тощо);
- результати виконання експериментальної частини (таблиці вимірів, графіки залежностей), висновки по окремих експериментах;
- загальні висновки по роботі.

Посібник не передбачає окремого загального списку літератури, для спрощення користування вони приводяться у кожній роботі.

## ЗАГАЛЬНА ІНСТРУКЦІЯ З ОХОРОНИ ПРАЦІ

Лабораторні роботи виконуються у спеціально призначеній лабораторії, обладнаній підводом електроенергії, водопостачанням, водовідводом, а також засобами пожежогасіння.

На першому занятті викладач проводить вступний інструктаж з техніки безпеки, що реєструється у відповідному журналі під розпис.

### Загальні вимоги

До лабораторної роботи допускаються студенти, які знають будову, принцип роботи, правила експлуатації лабораторної установки та пройшли інструктаж з правил безпеки.

### При підготовці до лабораторної роботи:

- до початку лабораторної роботи кожен студент зобов'язаний ознайомитися з правилами безпеки при виконанні даної роботи;
- перед початком роботи пересвідчитись у справності і ефективності витяжної вентиляції (якщо вона має місце) та інших захисних засобів;
- не починати виконання експериментальної частини роботи без засобів індивідуального захисту (спецодягу, окулярів, рукавичок, тощо);
- не починати виконання експериментальної частини роботи без відповідного розпорядження викладача або лаборанта;
- при використанні лабораторних установок з електричним обладнанням безпосередньо перед вмиканням перевірити захисне заземлення (занулення), стан електропроводки та пускової апаратури.

### Під час виконання роботи:

- не тримати на робочому місці сторонні предмети;
- не переходити самовільно на інші робочі місця і не пересуватися без потреби по лабораторії;
- перед виконанням експерименту розподілити обов'язки між членами бригади (ланки) і чітко додержуватись у процесі досліджень;
- не скупчуватись навколо робочого місця, дбати про вільні проходи до аптечки та інвентарю пожежогасіння;

### Після закінчення експериментальної частини роботи:

- привести лабораторну установку у вихідне положення, прибрати та здати робоче місце лаборанту або викладачу.

У разі виникнення пожежі необхідно негайно проінформувати викладача або лаборанта, подзвонити за номером 101.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ НА МОЛОТКОВИХ ДРОБАРКАХ

**Мета роботи:** 1) вивчити будову і принцип роботи дробарки; 2) визначити експериментально основні параметри процесу дроблення на молотковій дробарці різних видів сировини; 3) побудувати графік залежності показників роботи дробарки від розмірів отворів решета.

Час виконання роботи 4 год.

#### **1 Порядок виконання роботи**

- розглянути будову та принцип дії експериментальної дробарки;
- розрахувати основні параметри процесу дроблення;
- провести експериментальні дослідження процесу дроблення на молотковій дробарці;
- обробити статистично результати експерименту;
- побудувати графік залежності показників роботи молоткової дробарки від розмірів отворів решета;
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### **2 Завдання для самопідготовки**

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

**- повторити:**

- 1) основні загальні питання процесу подрібнення, теоретичні основи процесів подрібнення;
- 2) основні способи і машини, які застосовуються для подрібнення сировини та продукції харчових і переробних виробництв;

**- знати:**

- 1) область застосування процесів подрібнення на переробних та харчових підприємствах;
- 2) місце подрібнюючих машин у технологічних лініях переробних виробництв, загальну класифікацію дробарок;
- 3) основні схеми компонування молоткових подрібнювачів;

**- вміти:** проводити налаштування експериментальної дробарки за умовами дослідів, користуватися контрольно-вимірювальними приладами, проводити визначення основних аналітичних залежностей за темою дослідження, будувати графічні інтерпретації результатів досліджень.



### 3 Загальні відомості про молоткові дробарки

Молоткові дробарки одержали широке розповсюдження у харчовій та переробній промисловості завдяки спроможності отримувати високодисперсну якісну суміш подрібнених частинок на одному ступені подрібнення.

Молоткові дробарки більш ефективні при руйнуванні крихких матеріалів (зерна, цукру, солі та ін.) і менш ефективні при подрібненні вологих продуктів та продуктів з високим вмістом жиру.

Молотки у процесі дроблення повинні переміщатися з такою коловою швидкістю, при якій забезпечувалося б первинне руйнування матеріалу у момент удару по ньому молотком. Цю необхідну швидкість можна визначити приблизно виходячи з кількості руху:

$$m = (V_2 - V_1) = F \cdot \tau, \quad (1)$$

де:  $m$  - маса частинки, що подрібнюється, кг;

$V_2$  - швидкість частинки після удару об молоток, м/с;

$V_1$  - швидкість частинки до удару об молоток, м/с;

$F$  - сила удару, необхідна для первинного руйнування частинки, Н;

$\tau$  - тривалість удару, яка може бути прийнята рівною  $1 \cdot 10^{-5}$  с.

Оскільки швидкість  $V_1$  значно менша за  $V_2$ , можна прийняти, що:

$$m \cdot V_2 = F \cdot \tau. \quad (2)$$

Очевидно  $V_2$  дорівнює колівій швидкості молотка. Звідси:

$$V_2 = F \cdot \tau / m. \quad (3)$$

Для зернівки пшениці, середня маса якої дорівнює  $2,94 \cdot 10^{-5}$  кг і сила, необхідна для руйнування частинки,  $P = 120$  Н, колова швидкість:

$$V_2 = \frac{120 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{2,94 \cdot 10^{-5}} = 40,8 \text{ м/с}$$

Практично швидкість приймають дещо більшою – до **50** м/с, оскільки при ударі повинне відбуватися не тільки первинне руйнування, але і подальше подрібнення зерна.

Істинна (дійсна) продуктивність молоткової дробарки (в кг/с) визначається за виразом:

$$Q_{\delta} = m_r / t, \quad (4)$$

де:  $m_r$  - маса певної наважки продукту, кг;

$t$  - тривалість подрібнення наважки, с ;

Теоретична продуктивність дробарки  $Q_T$  (т/г) визначається за емпіричною формулою:

$$Q_T = \frac{3,6 \cdot K_1 \cdot \rho \cdot D^2 \cdot L \cdot n}{60}, \quad (5)$$

де  $K_1$  - емпіричний коефіцієнт, який залежить від типу і розмірів елементів ситової поверхні;

$\rho$  - об'ємна маса продукту, що подрібнюється, кг/м<sup>3</sup>;

$D$  - діаметр ротора дробарки, м;

$L$  - довжина ротора дробарки, м;

$n$  - частота обертання ротора, об/хв.

Емпіричний коефіцієнт приймається у межах:

$K_1 = (1,3...1,7) \cdot 10^{-4}$  для сит з отвором діаметром до 3мм;

$K_1 = (2,2...5,25) \cdot 10^{-4}$  для лускатих сит і сит з отвором діаметром 3...10мм.

Менші значення коефіцієнта  $K_1$  приймаються для сит з меншим розміром отворів.

Питома витрата енергії на подрібнення у кВт·с/кг

$$P_{num} = (P_p - P_{xx}) / Q_{\delta} \quad (6)$$

де:  $P_p$  - потужність електродвигуна під навантаженням, кВт;

$P_{xx}$  - потужність холостого ходу електродвигуна, кВт;

Теоретична потрібна потужність електродвигуна  $P_T$  (кВт), що витрачається на процес подрібнення обчислюється за формулою:

$$P_T = \frac{3,6 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \rho \cdot D^2 \cdot n}{60}, \quad (7)$$

де  $K_2$  - коефіцієнт, що дорівнює  $6,4 \dots 10,5$ ; менше значення приймаємо при грубому подрібненні, а більше – при тонкому.

#### **4 Оснащення робочого місця лабораторної роботи**

- 1 Експериментальна молоткова дробарка.
- 2 Переносний вимірювальний комплект К-50.
- 3 Ваги лабораторні ВНЦ-2.
- 4 Ємності для наважок матеріалів для подрібнення.
- 5 Пакети для подрібненого матеріалу.
- 6 Секундомір.
- 7 Зразки зернового матеріалу для дроблення.

Для проведення лабораторної роботи застосовується малогабаритна молоткова дробарка, показана на рисунку 1 з вільно підвішеними молотками.

Основними частинами даної конструкції є: дробильна камера 2, живильний і відвідний патрубки 4 і 9, молотковий ротор, електродвигун 5, клинопасова передача 7 і рама 1.

Рама 1 дробарки зварна і складається з столу і чотирьох ніжок. На столі, за допомогою двох стійок, закріплений корпус та електродвигун – на двох полозах натяжного пристрою.

Корпус 2 дробильної камери з одного боку закритий фланцем, на якому закріплена опора з двома радіальними кульковими підшипниками, а з другого боку – кришкою.

Для подачі зернової маси у верхній частині корпусу встановлений живильний патрубок 4 висотою 410 мм і діаметром 100 мм.

На живильному патрубку встановлене мірне скло 8 для візуального визначення витрати матеріалу.



- 1 - рама;
- 2 - робоча камера;
- 3 - регулююча заслінка;
- 4 - живильний патрубок;
- 5 - електродвигун;
- 6 - клинопасова передача;
- 7 – пусковий автомат;
- 8 - мірна шкала;
- 9 - вихідний патрубок (рукав);
- 10 - дека; 11 - вал ротора;
- 12 - планка; 13 - вісь;
- 14 - молоток.

Рисунок 1 – Експериментальна молоткова дробарка

Для привода дробарки використовується електродвигун 5 марки **4A90S4** номінальною потужністю **3,0** кВт та частотою обертання **1410** об/хв. Обертання від вала двигуна передається ротору дробарки клинопасовою передачею. Діаметр ведучого шківів складає **150** мм, веденого – **90** мм. Натяг паса регулюють переміщенням двигуна по полозках рами. Клинопасова передача закрита захисним кожухом. Ротор дробарки (рисунок 2) складається з вала 1 з фланцем 2, маточини 7 з привареними до неї двома планками 6, двох пальців 3 з набором молотків 4 і дистанційних втулок 5.

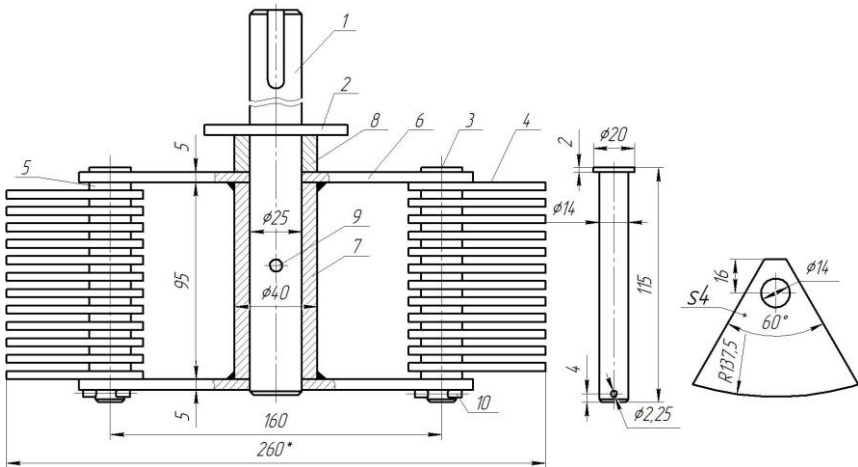


Рисунок 2 – Ротор експериментальної молоткової дробарки

1 - вал; 2 - фланець ротора; 3 - палець; 4 - молотки; 5 - дистанційні втулки; 6 - планки ротора; 7 - маточина ротора; 8 - втулка дистанційна; 9 - штифт; 10 - шплінт.

Обертаючий момент від вала до маточини передається за допомогою двох циліндричних заклепаних штифтів 9 діаметром 8мм.

Палець 3, вільно вставлений в отвори планок 6, фіксується від осового переміщення буртиком і стопорним шплінтом 9. На кожному з пальців розміщено по 12 молотків і стільки ж дистанційних втулок. Молотки секторної форми виготовлені зі сталі товщиною 4 мм.

На пальцях молотки і втулки розміщені в шаховому порядку, що забезпечує при обертанні ротора повне перекриття молотками внутрішньої поверхні дробильної камери.

## 5 Порядок виконання експериментальної частини роботи

1) Студентська група ділиться на чотири бригади, які вибирають початкові дані і умови експерименту за таблицею 1.

2) Підключити вимірювальний комплект К-50 до схеми електродвигуна дробарки;

Таблиця 1 – Вихідні дані до виконання роботи

Номер досліджу	Умови дроблення	Матеріал дроблення для кожної бригади				Маса наважки, кг
		I	II	III	IV	
№1	Решето з круглим отвором $\varnothing$ 5,5	Пшениця	Овес	Кукурудза	Горох	1
№2	Решето з круглим отвором $\varnothing$ 6,5					1
№3	Решето з круглим отвором $\varnothing$ 7,5					1
№4	Без решета					1

3) Встановити на дробарці решето (згідно таблиці 1);

4) Засипати в приймальний патрубок дробарки порцію (наважку) зерна масою 1 кг;

5) Запустити дробарку і за допомогою приладу К-50 визначити потужність холостого ходу електродвигуна ( $P_{xx}$ );

6) Відкрити заслінку і увімкнути секундомір. Одночасно заміряти потужність електродвигуна під навантаженням;

7) У момент закінчення дроблення вимкнути секундомір;

8) Встановити на дробарці наступне за номером решето і повторити дослід у тій же послідовності;

9) Дані, отримані при кожному досліді занести в таблицю 2;

10) Провести розрахунок істинної продуктивності молоткової дробарки за формулою (4) і порівняти її значення з теоретичною продуктивністю, розрахованою за формулою (5).

11) Розрахувати питому витрату енергії на подрібнення за формулою (6) і дані занести в таблицю 2.

12) Розрахувати теоретичну потрібну потужність на подрібнення за формулою (7) і порівняти її з експериментальними значеннями потужності.

13) За наслідками експерименту побудувати графік залежності продуктивності і питомої витрати енергії на привод дробарки від розмірів отвору решета.

14) Привести дробарку у вихідне положення і прибрати робоче місце.

## 6 Обробка результатів експерименту

1) Занести одержані дані експерименту та результати розрахунків у таблицю 2 .

Таблиця 2 – Результати проведеного експерименту

Номер досліджу	Діаметр отворів решета, мм	Тривалість досліджу, с	Продуктивність кг/с	Витрата енергії,кВт		Питома витрата енергії подрібнення, кВт·с/кг
				На холостому ходу, $P_{xx}$	На робочому ходу, $P_{px}$	
1						
2						
3						
4						

2) Побудувати графік залежності ефективності роботи молоткової дробарки від розмірів отворів решета (за наведеним прикладом).

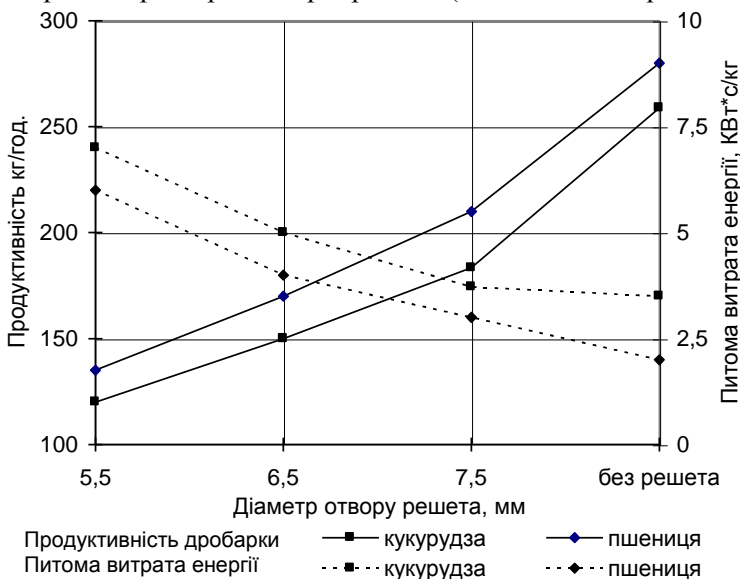


Рисунок 3 – Приклад оформлення графіка залежності параметрів ефективності роботи молоткової дробарки від розмірів отворів решета

3) Оформити звіт з роботи згідно з переліком етапів, рекомендованих у розділі „Загальні організаційно-методичні передумови“.

### **7 Вимоги безпеки**

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

### **8 Контрольні питання**

- 1 З якою метою застосовують подрібнення твердих матеріалів?
- 2 Якими методами проводиться подрібнення твердих матеріалів.
- 3 Які схеми подрібнення і типи подрібнюючих машин застосовуються у харчовій промисловості?
- 4 На які види підрозділяється подрібнення залежно від початкових і кінцевих розмірів великих шматків матеріалів?
- 5 Якими показниками характеризується процес подрібнення?
- 6 Перерахуйте загальні вимоги до подрібнюючих машин.
- 7 Від яких характеристик подрібнюваних матеріалів залежить робота, що витрачається на подрібнення?
- 8 Як визначити ступінь подрібнення.
- 9 Назвіть процеси дроблення залежно від ступеня подрібнення.
- 10 Поясніть принцип дії і будову молоткової дробарки.
- 11 Які параметри характеризують роботу молоткової дробарки?
- 12 Як впливають форма і розмір отворів сита на ступінь подрібненого продукту, витрати електроенергії і продуктивності дробарки?

### **9 Тестові завдання**

1) За якою формулою визначають ступінь подрібнення матеріалу?

$$1 \lambda = D_n / d_k ;$$

$$2 \beta = V_n / V_k ;$$

$$3 \varepsilon = (V_{жс} - V_p) / V_k ;$$

$$4 \varphi = S_0 / S$$



**2) Яке формулювання відповідає основному закону подрібнення (за П.А. Ребіндером) ?**

1. Повна робота подрібнення дорівнює сумі робіт на деформацію матеріалу і утворення нових поверхонь;

2. Витрати робіт на подрібнення прямо пропорційні об'єму частини тіла, що деформується;

3. Робота, необхідна для подрібнення тіла, прямо пропорційна площі новоутворених поверхонь;

4. Робота на подрібнення пропорційна середньому геометричному з об'єму і площі поверхні шматка, що подрібнюється.

**3) Укажіть автора закону подрібнення, який описується формулою  $A = K\sqrt{V \cdot S} = K_3 \cdot D^{2,5}$**

1. Ф. Бонд;

2. В.П. Кирпичов і Ф. Кік;

3. П. Рітгінгер;

4. П.А. Ребіндер.

**4) Які конструкції дробарок практично не використовуються у харчових технологіях:**

1. Шокові, гравітаційні;

2. Валкові, молоткові;

3. Дискові, зубчасті;

4. Кульові і стрижневі млини.

**5) Які види силової дії застосовують для подрібнення зерна в молоткових дробарках?**

1. багатократний удар;

2. стиск і зсув;

3. абразивний знос;

4. похилий зріз.

**6) Яким основним способом проводять регулювання продуктивності молоткової дробарки в процесі її роботи?**

1. зміненням кількості молотків;

2. зміненням кількості рифлів на поверхні деки;

3. заміною сит з різними діаметрами і формою отворів;

4. зміненням кута заточування молотка.

**7) У яких межах приймається робоча швидкість молотка зернової дробарки:**

1. 40...80 м/с; 2. 15...40 м/с; 3. 80...120 м/с; 4. 120...150 м/с.

**8) Від яких параметрів залежить величина теоретичної продуктивності молоткової дробарки?**

1. діаметра ротора і діаметра деки;
2. діаметра і довжини ротора;
3. діаметра ротора і кількості молотків;
4. діаметра ротора і кількості отворів сита.

**9) До якого негативного явища може привести надмірно висока швидкість ротора зернової дробарки?**

1. надмірного подрібнення зерна;
2. надмірного перегріву підшипників ротора;
3. надмірного підвищення питомих витрат енергії;
4. не впливає на жодний вказаний параметр.

**10) Вкажіть межі діаметрів круглих отворів сит, які рекомендують застосовувати в зернових молоткових дробарках?**

1. 1,5...2 мм; 2. 2...5 мм; 3. 5...10 мм; 4. 10...20 мм.

### **Література**

1. Ялпачик Ф.Е. Кормодробилки, конструкция, расчет / Ф.Е. Ялпачик, Г.С. Ялпачик. Запорожье, Коммунар 1992. - 290 с.

2. Лабораторный практикум по процессам і аппаратам пищевых производств. Под ред. А.С. Гинзбурга. – М.:, Агропромиздат, 1990. - 256 с.

3. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. / С.В. Мельников. - Л.: Колос, 1978. - 560 с.

4. Горбатюк. В.И. Процессы и аппараты пищевых производств. / В.И. Горбатюк. - М.: Колос 1999, - 335с.

5. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - М.: Колос, 2000. - 551с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### СИТОВИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛУ, ПОДРІБНЕНОГО НА МОЛОТКОВІЙ ДРОБАРЦІ

**Мета роботи:** 1) вивчити будову ситового класифікатора; 2) експериментально визначити фракційний склад подрібненого продукту та параметри подрібнювання, виявити закономірності процесу дроблення; 3) побудувати залежність вмісту подрібненої фракції від розміру сита решета.

Час виконання роботи 4 год.

#### **1 Порядок виконання роботи**

- розглянути принцип дії та будову експериментального ситового класифікатора;
- ознайомитись з основними показниками процесу ситового аналізу;
- провести експериментальні дослідження процесу ситового аналізу на лабораторному класифікаторі;
- обробити статистично результати експерименту;
- побудувати графік залежності процентного вмісту подрібненої фракції від розміру сита решета молоткової дробарки;
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### **2 Завдання для самопідготовки**

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** класифікацію сировини і продуктів; основні способи і машини для їх виконання, загальні теоретичні положення ситового аналізу; поняття модуля помелу та середнього розміру часток;
- **знати:** область застосування процесу сортування на переробних підприємствах; місце сортувальних машин у технологічних лініях підприємств; основні види сортувальних машин та їх загальну будову;
- **вміти:** проводити налаштування ситового класифікатора (розсіву-аналізатора) за умовами запланованих дослідів; розраховувати величини модуля помелу, середнього розміру часток, процентного вмісту фракції; будувати графіки залежностей за результатами дослідів.

### 3 Загальні відомості про ситовий аналіз

За загальною класифікацією сипучі матеріали залежно від розмірів часток підрозділяють на 5 груп: кускові ( $d_{max} > 10$  мм), грубозернисті ( $d_{max} = 2...10$  мм), дрібнозернисті ( $d_{max} = 0,5...2$  мм), порошкоподібні ( $d_{max} = 0,05...0,5$  мм), пилоподібні ( $d_{max} < 0,05$  мм).

З метою вивчення гранулометричного складу подрібненого матеріалу він піддається ситовому аналізу, тобто, послідовному просіванню через сита, отвори яких поступово зменшуються. Таким чином, матеріал поділяється на кілька фракцій з різними розмірами часток.

Для проведення ситового поділу сипучих матеріалів на фракції застосовують штамповані та плетені (дротові) із круглого металевого дроту і тканинні із шовкових ниток, капрону, нейлону сита.

На рисунку 1 показані основні види штампованих ситових полотен з різною формою отворів.

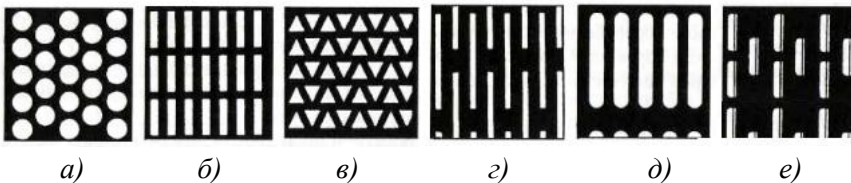


Рисунок 1 – Форма отворів ситових полотен:

- а) круглі; б), д) щілинні; в) трикутні; з) щілинні вузькі;  
е) лускаті для сушіння зерна.

Продуктивність просівання залежить від числа отворів на одиницю площі сита.

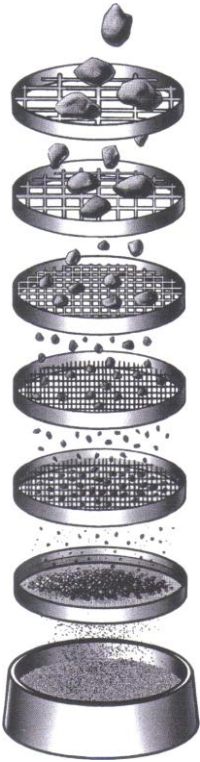
Характеризуючи ефективність використання робочої поверхні сита, застосовують поняття живого перетину сита, який вимірюють у відсотках:

$$\varphi = \frac{S_o}{S} \cdot 100, \quad (1)$$

де  $\varphi$  - показник живого перетину сита, %;  $S_o$  - сумарна площа отворів, м<sup>2</sup>;  $S$  - загальна площа поверхні сита, м<sup>2</sup>.

Живий перетин штампованих сит не перевищує 50%, у тканинних він може досягати 70%.

При проведенні ситового аналізу відповідна навіска суміші, яка містить частки різних розмірів, пропускається через набір сит, встановлених одне над іншим у порядку убутання розмірів отворів зверху донизу.



На кожному ситі затримуються саме ті частки, розміри яких більші за розмір отворів цього сита, але менші за розмір отворів верхнього сита.

Зважаючи кожен фракцію, отриману в такий спосіб визначаємо її масу  $m_i$  (кг) і процентний вміст  $Y$ , (%) цієї фракції відносно маси вихідної наважки  $G$  (кг).

$$Y = \frac{m_i}{G} \cdot 100, \% ; , \quad (2)$$

Середній розмір часток  $d_{i\text{cp}}$   $i$ -тої фракції розраховується як середнє арифметичне між розмірами отворів  $d_j$  сита, на якому фракція затрималася, і розмірами отворів  $d_{j-1}$  попереднього сита.

$$d_{i\text{cp}} = 0,5(d_j + d_{j-1}), \quad (3)$$

де  $d_{i\text{cp}}$  - середній розмір часток  $i$ -тої фракції, мм;  $d_j$  - діаметр отворів нижнього сита, мм;  $d_{j-1}$  - діаметр отворів верхнього сита, мм.

Рисунок 2 – Схема ситового аналізу

Ступінь подрібнювання матеріалу визначається за виразом:

$$\lambda = \frac{d_{\text{cp}}^{\text{вих}}}{d_{\text{cp}}^{\text{подр}}} = \frac{D_e}{M}, \quad (4)$$

де  $d_{\text{cp}}^{\text{вих}}$ ,  $d_{\text{cp}}^{\text{подр}}$  - середній розмір часток вихідного і подрібненого продукту;  $D_e$  - еквівалентний діаметр зернівки.

Модуль помелу визначається за формулою:

$$M = \frac{0,5m_0 + 1,5m_1 + 2,5m_2 + 3,5m_3}{100}, \quad (5)$$

де  $M$  - модуль подрібнення, мм;  $m_0$  - маса матеріалу на дні класифікатора, кг;  $m_1, m_2, m_3$  - маса часток на першому, другому і третьому ситах, кг;  $0,5; 1,5; 2,5; 3,5$  - відповідно, середній розмір часток  $d_{i\text{cp}}$ .

Еквівалентним діаметром ( $D_e$ ) зерна називається діаметр кулі, об'єм якої дорівнює дійсному об'єму зерна.

З формули об'єму кулі  $V_k = \frac{\pi \cdot D_e^3}{6} = V_z$  еквівалентний діаметр

$$D_e = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_z}{\pi}} = 1,24 \cdot \sqrt[3]{V_z} \quad (6)$$

Значення еквівалентного діаметра визначається зануренням 100 зерен у бензин, налитий у мірний циліндр.

#### 4 Оснащення робочого місця лабораторної роботи

- 1 Класифікатор зерна (розсів-аналізатор).
- 2 Набір решіт із круглими отворами (1; 2; 3; 4 і 5 мм).
- 3 Ваги лабораторні.
- 4 Ємності для наважок.
- 5 Секундомір.
- 6 Зразки матеріалу, що досліджується.

Для проведення гранулометричного аналізу подрібненої зернової маси використовується ситовий класифікатор важільного типу з регульованою частотою і амплітудою коливань. Регулювання частоти коливань сит здійснюється застосуванням електродвигуна постійного струму, а амплітуди – приводом від кривошипно-кулісного механізму з перемінним розміром кривошипу. Рівні швидкості і прискорення усіх сит у класифікаторі досягаються за рахунок встановлення набору сит на ланку паралелограмного механізму, що рухається поступально, а це забезпечує коливання сит не тільки у вертикальному, але й у горизонтальному напрямку.

Схема класифікатора-аналізатора і фото його зовнішнього вигляду представлені на рисунках 3 і 4.

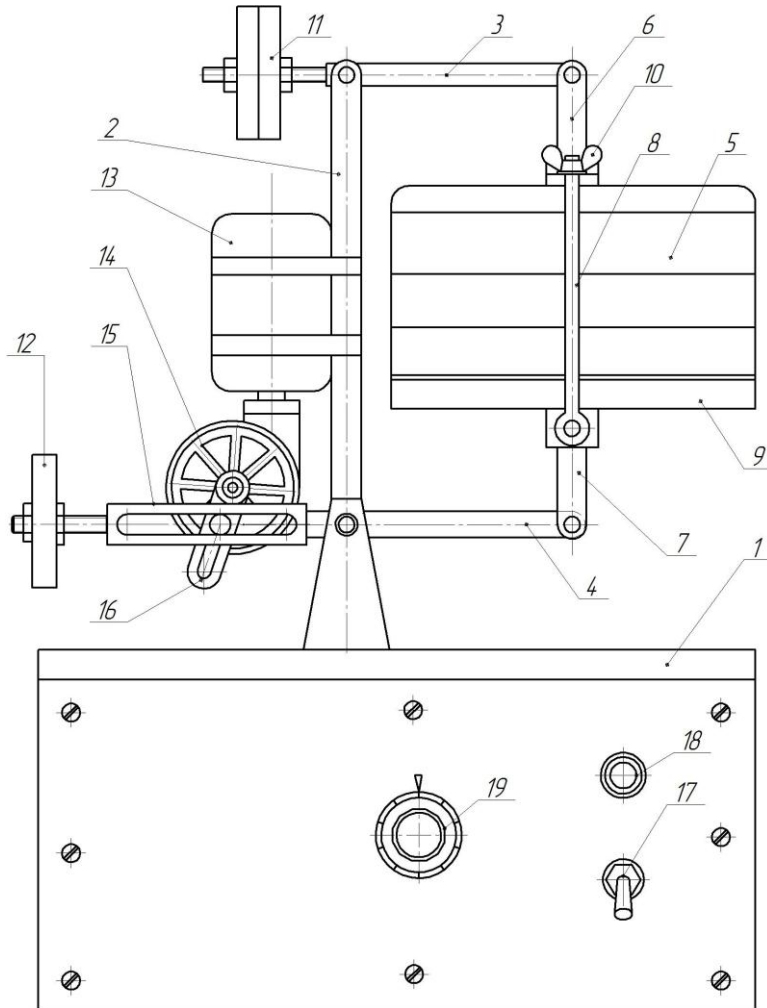


Рисунок 3 – Схема ситового класифікатора-аналізатора:

1 - основа; 2- стійка; 3 - важіль верхній; 4 - важіль нижній; 5 - набір сит; 6, 7 - шарнір верхній і нижній; 8 - стяжка, 9 - тарілка; 10 - гайка-баранчик; 11, 12 - противаги; 13 - електродвигун; 14 - редуктор; 15 - куліса; 16 - кривошип; 17 - тумблер вмикання; 18 - сигнальна лампа; 19 - регулятор.

Основними частинами класифікатора (рисунок 3) є стійка 2, закріплена на основі 1 та паралелограмний механізм, утворений верхнім 3 і нижнім 4 важелями. Ведуча ланка – нижній важіль, який є продовженням куліси 15. Обидва важелі мають противаги 11 і 12.



Вертикальна ланка паралелограма являє собою набір сит 5, затиснений між планкою 8 і тарілкою 9, які через шарніри 6 і 7 прикріплені до важелів 3 і 4. Набір сит стягується стяжками з гайками-баранчиками 10.

Така конструкція кріплення сит дозволяє легко і швидко розбирати набір, змінювати кількість у ньому сит, поміщати аналізовану пробу у верхнє сито, зсипати з кожного сита фракції, що потрапили до них, і знову збирати ситовий набір.

Рисунок 4 – Фото класифікатора

Привод класифікатора здійснюється від електродвигуна постійного струму 13 (типу 2ПП-40 потужністю 70 Вт і номінальною частотою обертання вала  $n_n = 4100$  об/хв. через черв'ячний редуктор 14 з передаточним числом  $u = 51$ ).

На вихідному валу черв'ячного редуктора 14 жорстко посаджений кривошип 16, палець якого входить у паз куліси 15. Конструкція кривошипа дозволяє змінювати його радіус і, тим самим, амплітуду руху ситового набору.



Основа 1 опирається на коробчасту раму класифікатора, всередині якої розташовані елементи електричної схеми (автотрансформатор, випрямляч та ін.). На передній стінці рами встановлений тумблер 17 для вмикання двигуна, сигнальна лампа 18 і регулятор керування зміненням частоти обертання електродвигуна. Живлення електросхеми класифікатора одержує від побутової мережі 220 В, 50 Гц.

При вмиканні двигуна, кривошип, що обертається з його валом, надає кулісі і пов'язаному з нею набору сит інтенсивні коливання. При цьому наважка проби, що аналізується, поміщена у верхнє сито, розсіюється послідовно розташованими решетами з різними формами і розмірами отворів на окремі фракції. Зважаючи ці фракції та обчислюючи їх відсотковий вміст у пробі кожної з них, визначають гранулометричний склад зернової суміші.

### **5 Методика проведення роботи**

Ситовий аналіз виконується для визначення ефективності дроблення зерна, а також основних параметрів дроблення (ступеня подрібнення, модуля подрібнення, продуктивності просівання тощо).

Лабораторна робота виконується у наступній послідовності:

1) Відібрати з кожного пакета пробу в поліетиленові стаканчики і зважити проби на лабораторних стрілочних вагах типу ВМЦ-2. Вага кожної проби повинна становити 100 г.

2) Вибрати для класифікатора комплект з трьох сит: 1-е сито  $\varnothing 1\text{мм}$ , 2-е сито –  $\varnothing 2\text{мм}$  і 3-е сито –  $\varnothing 3\text{мм}$ .

3) Встановити на класифікатор ситовий піддон, три пусті сита і кришку сит, зафіксувати ситовий набір.

4) Відрегулювати на холостому ходу режим роботи класифікатора: амплітуда коливань – 100 мм, частота коливань 110...120 кол./хв.

5) Висипати на верхнє решето класифікатора приготовлену наважку зернової суміші, закрити кришкою, закріпити набір сит.

6) Увімкнути електродвигун і протягом 3 хвилин провести сортування подрібненої зернової суміші на фракції.

7) Зважити на лабораторних аналітичних вагах типу ВЛКТ-50М кожну фракцію, що залишилася на відповідних решетах, а також „прохід“ нижнього решета

8) Занести в таблицю 1 значення гранулометричного складу фракцій.

9) Розрахувати масу кожної фракції у відсотковому вмісті **B** (%) цієї фракції відносно вихідної наважки по „сходу“ і „проходу“. Середній розмір часточок  $d_{i,cp}$  визначається як середнє арифметичне діаметрів верхнього і нижнього сита.

$$d_{i,cp} = \frac{d_{j,сум} + d_{j+1сум}}{2}, \quad (8)$$

Таблиця 1 – Ситовий аналіз дробленого зерна

Проба за номером решета дробарки	Розмір сита класифікатора, $d_{сит}$ , мм	Маса фракцій, г		Середній розмір часток $d_{cp}$ , мм	Ступінь подрібнювання, $\lambda$	Модуль подрібнення, М
		м, г	В, %			
№1 Ø 5,5мм	3					
	2					
	1					
	піддон					
№2 Ø 6,5мм	3					
	2					
	1					
	піддон					
№3 Ø 7,5мм	3					
	2					
	1					
	піддон					
№4 Без решета	3					
	2					
	1					
	піддон					

Так, наприклад, середній розмір часточок на піддоні:

$$d_{\text{нід.ср}} = \frac{0+1}{2} = 0,5 \text{ мм}, \quad (9)$$

де  $0$  - діаметр отворів піддона;

$1$  - діаметр отворів першого сита,  $d_{i.\text{cum}} = 1$  мм.

Аналогічно,

$$d_{1\text{ср}} = \frac{d_{1\text{cum}} + d_{2\text{cum}}}{2}, \quad (10)$$

або

$$d_{1\text{ср}} = \frac{1+2}{2} = 1,5 \text{ мм}$$

Дані розрахунку заносимо в таблицю 1.

10) Провести розрахунок ступеню подрібнювання  $\lambda$  за формулою (4) та модуля подрібнення  $M$  за формулою (5) для кожного решета молоткової дробарки.

11) Побудувати за результатами експерименту графік залежності процентного вмісту фракцій  $Y$  від розміру отворів сит дробарки (проби №1...№4)  $Y = f(d_j)$ , рисунок 5.

12) Привести класифікатор у вихідне положення, прибрати робоче місце.

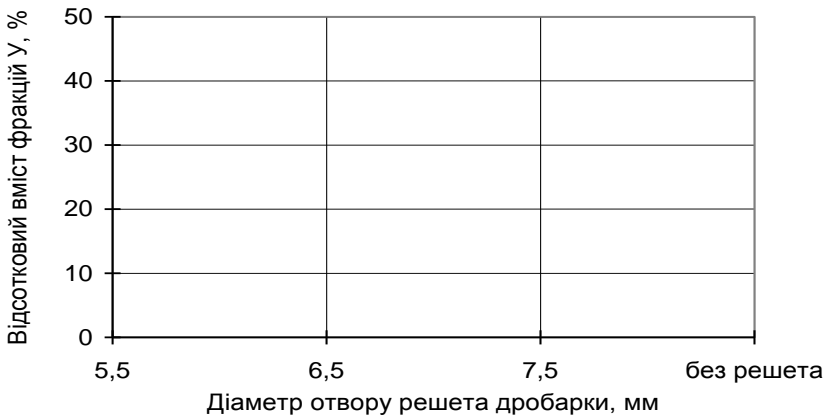


Рисунок 5 – Координати для побудови графіка

## 6 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведеної у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## 7 Контрольні питання

- 1 Назвіть відомі вам способи сортування зернового матеріалу.
- 2 Які сита використовують у харчовій промисловості?
- 3 Як можна оцінювати ефективність просівання?
- 4 Як визначити ступінь подрібнювання?
- 5 Які продукти класифікують методом ситового аналізу?
- 6 На чому заснована класифікація матеріалів методом просівання?
- 7 На чому заснована гідравлічна і повітряна класифікація?
- 8 Чим відрізняється однократна класифікація від багаторазової?
- 9 Чим характеризується тонке і надтонке подрібнення.
- 10 Укажіть область застосування ситового класифікатора.

## 8 Тестові завдання

### 1) За якими параметрами відбувається гідравлічне сортування?

1. Різниця в щільності зерна та домішок
2. Різниця у формі зерна та домішок
3. У залежності від ламінарного або турбулентного потоку рідини
4. Різниця в обсязі зерна та домішок.

### 2) За якою формулою визначається живий перетин сита?

1.  $\varphi = \frac{S_0}{S} \cdot 100\%$  ;
2.  $y = \frac{m_i}{M} \cdot 100\%$  ;
3.  $\eta = \frac{m}{m_i} \cdot 100\%$  ;
4.  $\eta = \frac{m}{y \cdot Q}$  .

### 3) Яка сила переміщує частинку по поверхні сита?

1.  $J = m \cdot a$
2.  $T = f \cdot G$
3.  $G = m \cdot g$
4.  $F = \xi \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\text{вум}}$

#### 4) Основна умова переміщення частинок по поверхні сита

$$1. n \geq 30 \sqrt{\frac{f}{r}}$$

$$2. \frac{\pi^2 \cdot n^2}{900} \cdot r > mg$$

$$3. m \cdot g = m \cdot \omega^2 \cdot r$$

$$4. n = \frac{30}{\sqrt{r}}$$

#### 5) Який параметр визначає модуль просіювання?

1. Середньоарифметичний розмір часток просіяних фракцій.
2. Процентний вміст маси фракції по відношенню до вихідної суміші.
3. Відношення маси частинок, що пройшли крізь сито до маси таких частинок у вихідній суміші.
4. Відношення сумарної площі отворів сита до загальної площі сита.

#### 6) На яких машинах виконується повітряна сепарація?

1. Відцентровий сепаратор.
2. Барабанный магнітний сепаратор.
3. Сепаратор з конічним обертовим циліндром.
4. Сепаратор з круговим поступальним рухом сит.

#### 7) За якими показником розділяється зерно і домішки на трієрі

1. По довжині зерна;
2. По товщині зерна;
3. По ширині зерна;
4. За формою поверхні.

#### 8) Як проводиться оцінка ефективності просіювання

1. Відношення маси частинок, що пройшли крізь сито, до маси таких же частинок у вихідній суміші.
2. Процентний вміст маси фракції по відношенню до вихідної наважки.
3. Відношення площі отворів сита до загальної площі сита.
4. Відношення маси частинок, що пройшли крізь сито (прохід), до маси частинок, що не пройшли через сито (сход).

**9) За якою формулою визначають еквівалентний діаметр зерна**

$$1. d = \sqrt{\frac{6V_3}{\pi}};$$
$$2. d = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} d_i \cdot m_i}{Q};$$
$$3. d = \frac{d_i + d_{i-1}}{2};$$
$$4. d = \frac{D}{i}.$$

**10) Які машини відносяться до розсіюючих?**

1. Грохоти, сепаратори, трієри, бурати.
2. Гідроциклони, відстійники, електростатичні сепаратори.
3. Тарілчасті сепаратори, осадові центрифуги, магнітні сепаратори.
4. Повітряні циклони, фільтри, магнітні сепаратори.

**Література**

1. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум. За редакцією проф. І.Ф. Малежика. К.: ІЗМН, 1997. - 276 с.

2. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев // - М.: Колос, 2000. - 551с.

3. Ялпачик Ф.Ю., Ситовий класифікатор для гранулометричного аналізу зерна та продуктів його переробки / Ф.Ю. Ялпачик, В.О. Олексієнко. // Збірник наукових праць ХДГУСТ. - Харків. 2001.

4. Горбатюк В.И. Процессы и аппараты пищевых производств. / В.И. Горбатюк. М.: Колос, 1999. - 335с.

5. Лонцин М. Основные процессы пищевых производств. – Перевод с английского. / М. Лонцин, Р. Мерсон. М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1983, - 381с.

6. Основы расчёта и конструирования машин и автоматов пищевых производств. – Под редакцией А.Я. Соколова. М.: Машиностроение, 1969. - 639с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ І ПРИВЕДЕНОЇ ДОВЖИНИ МОЛОТКІВ ДРОБАРКИ

**Мета роботи:** Дослідити вплив зношування молотків на змінення їх основних параметрів: приведеної довжини та моменту інерції, які прямо впливають на умови розвантаження осей підвісу від ударних імпульсів молотків.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основи теорії подрібнення сировини за допомогою молоткових дробарок;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальної лабораторної установки та іншим обладнанням робочого місця;
- сформувати початкові дані для проведення експерименту;
- провести експериментальні дослідження по визначенню моменту інерції та приведеної довжини молотка дробарки;
- обробити результати експерименту;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- скласти та оформити звіт з лабораторної роботи.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** основні поняття по теорії динамічної системи барабан – молоток;

- **знати:**

1) основні питання впливу зносу молотків на динаміку робочого органа молоткової дробарки;

2) вплив сил реакції, що виникають на кожному молотку при ударі об матеріал на осі їх підвісу і на опори барабана;

- **вміти:** проводити налаштування лабораторної установки, користуватися контрольно-вимірювальними приладами, визначати динамічні характеристики молотків.

### 3 Основні теоретичні положення

У дробарках вітчизняного виробництва застосовують достатньо велику номенклатуру молотків (рисунок 1). Для подрібнення зерна і м'яких продуктів використовують тонкі молотки: завтовшки 2...3 мм, а для стеблових кормів: завтовшки 6...8 мм і більше.

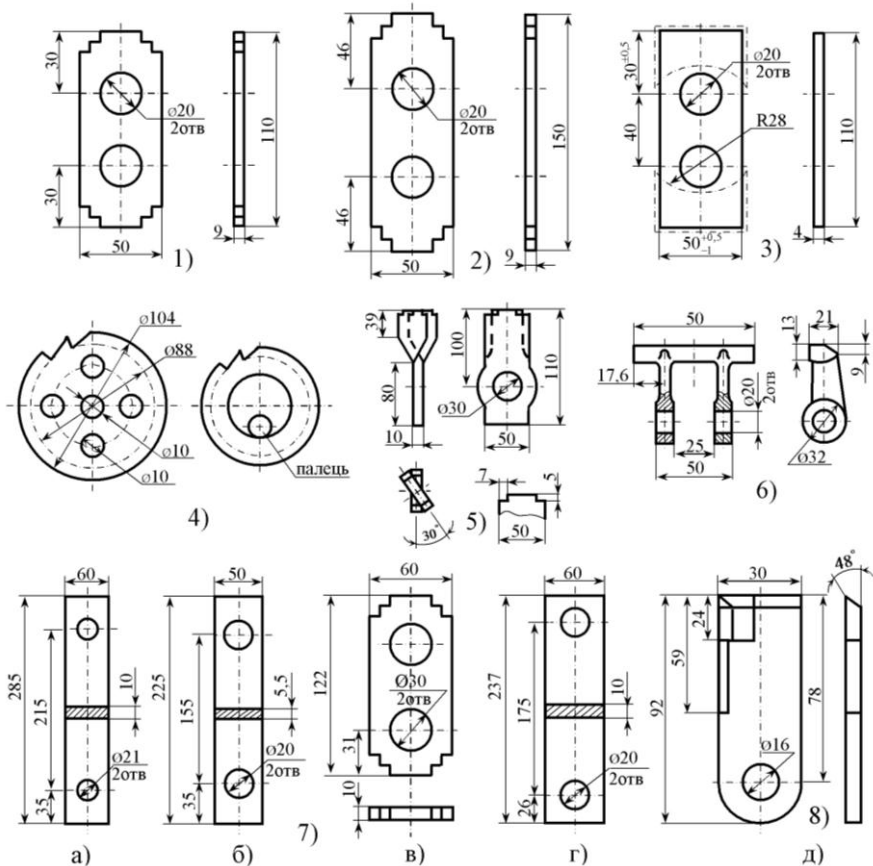


Рисунок 1 – Конструкції молотків молоткових дробарок

- 1) - ступінчасті нормальні; 2) - ступінчасті посилені; 3) – прямокутні; 4) - фігурні типу фрези; 5) - об'ємні АПК- 10; 6) - об'ємні ДДК; 7) - плоскі (дробарок агрегатів): а) - АВМ-0,4; б) - АВМ- 1,5; в) - ЛКБ-ФЕ; г) - СБ- 1,5); 8) - армовані сормайтом.



При руйнуванні зернового матеріалу сили реакції сприймаються кожним молотком і можуть досягати **200 Н** та більше. Значна частина цих сил передається на осі підвісу молотків і через них безпосередньо на вал барабана та його опори.

Дію цих зусиль у значній мірі збільшує висока частота їх виникнення і передача навіть частини цих сил осям підвісу молотків та на вал молоткового барабана викликає інтенсивне зношування зчленувань осей молотків і опор вала.

Таким чином, визначення ударних імпульсів, переданих на осі підвісу молотка, і умов розвантаження осей від цих силових імпульсів є одним з найважливіших завдань розрахунків молоткових барабанів подрібнюючих апаратів.

Для попередження передачі імпульсів ударів молотків їх осям підвісу і підшипникам барабана потрібне збереження умови

$$l_k/l_y = 1 \quad \text{або} \quad l_k = l_y \quad (1)$$

де  $l_k$  - приведена довжина молотка;

$l_y$  - відстань від осі підвісу молотка до центра удару.

Згідно теорії, приведена довжина молотка це розмір, який дорівнює довжині такого математичного маятника, частота вільних коливань якого дорівнює частоті коливань фізичного маятника, тобто, у цьому випадку, молотка.

При порушенні умови (1) деяка частина імпульсів удару молотків передається на їхні осі підвісу і через них на вал барабана.

Коефіцієнт передачі ударів  $k_y$ , який показує, яка частка імпульсів удару молотка передається на осі їхнього підвісу, визначається за наступною залежністю:

$$k_y = \frac{l_k}{l_y} - 1, \quad (2)$$

де  $k_y$  - коефіцієнт передачі імпульсу ударів.

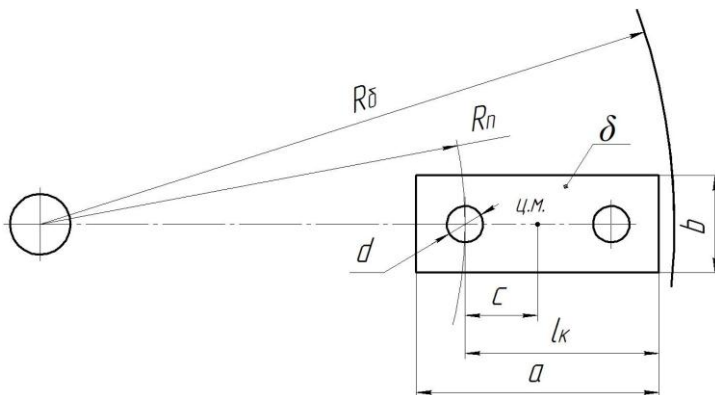


Рисунок 2 – Схема підвісу молотків дробарки

$R_n$  - радіус підвісу молотка;  $D_\delta = 2R_\delta$  - діаметр барабана дробарки;  $l_k$  - приведена довжина молотка;  $c$  - відстань до центра мас молотка;  $a$  - довжина молотка;  $b$  - ширина молотка;  $\delta$  - товщина молотка.

Розміри молотків дробарок КДУ-2,0-1 „Українка“ і дробарки агрегату АВМ-1,5 зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Основні розміри барабана і молотків дробарок, мм

Дробарка	Розміри молотка, мм					
	$a$	$b$	$c$	$l_k$	$d$	$\delta$
КДУ-2,0-1	110	50	23	78	20	4
АВМ-1,5	150	50	26	104	20	10

У процесі експлуатації дробарки приведена довжина молотків через зношування змінюється від початкової величини  $l_k$  до величини  $l_{ки}$ , внаслідок чого умова (1) роботи молотків без передачі сполученим деталям ударних імпульсів порушується. При цьому коефіцієнт передачі імпульсів удару зношеним молотком збільшується від

$$k_y = 0 \quad \text{до} \quad k_{yu} = \frac{l_k}{l_{ки}} - 1 \quad (3)$$

де:  $k_{yu}$  - коефіцієнт передачі імпульсів удару зношеним молотком;  $l_{ки}$  - приведена довжина зношеного молотка.

Відповідно до заводських вимог при граничному зношуванні контур перших зношених граней досягає поздовжньої осі симетрії отворів молотка (рис 3 б, г), а контур парних ним граней проходить на відстані 10 мм від кола найближчого отвору молотка (рисунок 3 в, д).

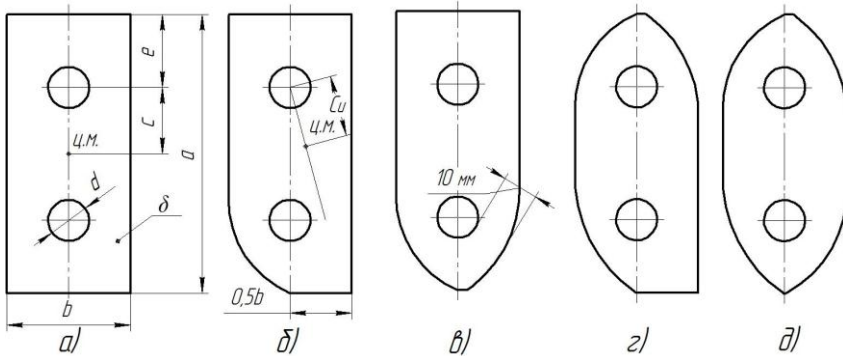


Рисунок 3 – Новий і зношені молотки дробарок:

а) новий; б) з однією; в) двома; г) трьома і д) чотирма зношеними до допустимих меж робочими гранями.

У процесі зношування молотків дробарок одночасно зі зміною форми контуру відбувається зміння їхніх динамічних параметрів: маси, відстані від центра маси до осі хитання, моменту інерції маси відносно цієї осі і приведенної довжини. Ці параметри пов'язані між собою відомою з механіки залежністю

$$I = m \cdot c \cdot l_{ки} \quad (4)$$

де:  $I$  - момент інерції маси молотка,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$m$  - маса молотка,  $\text{кг}$ ;

$c$  - відстань осі підвісу молотка до центра маси,  $\text{м}$ ;

$l_{ки}$  - приведена довжина молотка,  $\text{м}$ .

Для повного глушіння крутильних коливань маси барабана власна частота коливань молотка повинна дорівнювати або бути кратною частоті коливань маси барабана.

Тому повинна зберігатися умова:

$$\frac{R_n}{l_k} = N^2, \quad (5)$$

де  $R_n$  - радіус кола барабана, на якому розміщуються центри поперечних перерізів підвіски молотків;

$N$  - число повних коливань молотка, що здійснюється за один оберт ротора (кратність коливання).

Якщо кратність коливань прийняти  $N = 1; 1,5; 2; 2,5; 3$ , то, відповідно, одержимо:

$$\frac{R_n}{l_k} = 1; 2,25; 4; 6,25; 9. \quad (6)$$

При  $R_n/l_k = 1$  – реальна довжина молотка виходить дуже великою; при  $R_n/l_k = 6,25$  – дуже мала. Тому з наведеного ряду співвідношень кращими вважаються відношення:

$$\frac{R_n}{l_k} = 2,25 \quad \text{і} \quad \frac{R_n}{l_k} = 4 \quad (7)$$

Співвідношення  $R_n/l_k = 4$  вважається самим вигідним, тому що при цьому амплітуда коливань молотків максимальна і ударна енергія молотків використовується з найбільшою ефективністю.

Для зношених молотків степінь нерівномірності їх показників оцінюється коефіцієнтом змінення приведеної довжини:

$$k_i = l_{кз}/l_k, \quad (8)$$

де  $l_k$  і  $l_{кз}$  – приведена довжина нового і зношеного молотка.

Показником частини імпульсу удару, що передається на вісь підвісу молотка, є також модуль коефіцієнта удару:

$$k_y = |l_{кз}/l_k - 1| = |k_i - 1| \quad (9)$$

#### 4 Оснащення лабораторної роботи приладами та механізмами

1 Прилад для визначення приведеної довжини та моменту інерції молотків дробарок (рисунки 4 і 5).

2 Набір нових молотків та зношених молотків.

3 Електронні ваги ВЛКТ-500.

4 Призма для визначення центра маси зношених молотків.

5 Мірительний інструмент.

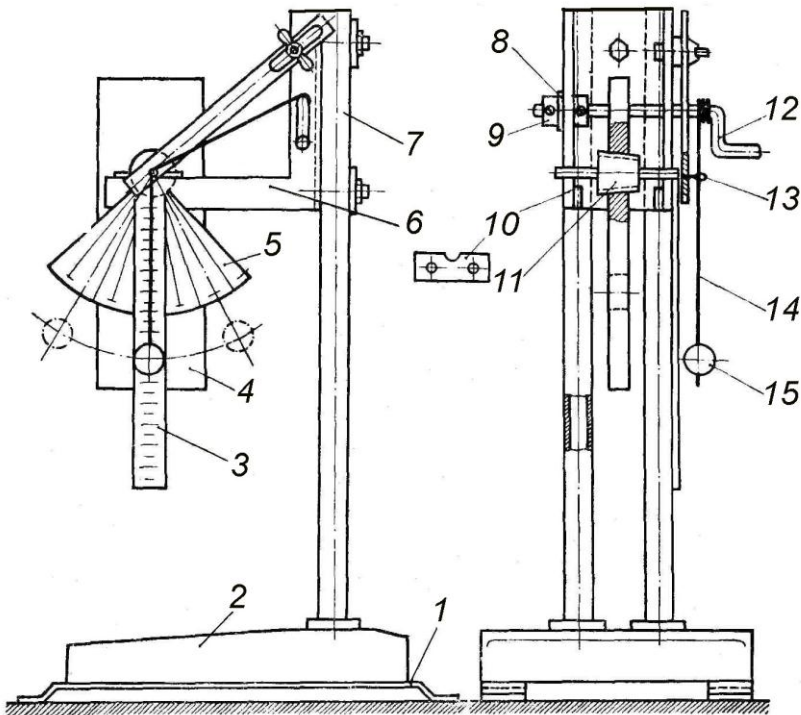


Рисунок 4 – Прилад для визначення приведеної довжини і моменту інерції молотка як фізичного маятника:

1 - пружина пластинчаста; 2 - основа; 3 - масштабна лінійка; 4 - молоток; 5 - шкала куткових амплітуд; 6 - кронштейн; 7 - стійка; 8 - гумова шайба; 9 - упорна втулка; 10 - опора осі; 11 - оправка з віссю; 12 - вороток; 13 - опора маятника порівняння; 14 - нитка; 15 - кулька (важок) маятника.

Визначення величин моменту інерції і приведеної довжини зношених молотків виконується на приладі, в основу якого покладений метод використання явища резонансу.

Коливання фізичного маятника (молотка) викликають коливання маятника порівняння, який має довжину, рівну приведеній довжині

фізичного маятника, настроєного в резонанс з фізичним. Маятник порівняння складається з тонкої практично невагомої нитки, довжина якої регулюється, і маленької сталеві кульки. Він імітує математичний маятник.

Основні частини приладу (рисунок 4): оправка 11 з тонкою віссю; дві ножові опори 10; кронштейн опор 6, закріплений на двох трубчастих стійках 7; голкове вушко 13, що використовують як опору нитки 14 з кулькою 15 маятника порівняння; вороток 12, обертанням якого можна змінювати довжину маятника порівняння; лінійка 3 для виміру довжини і кутова шкала 5 для фіксації кутових амплітуд коливання цього маятника. Основа 2 приладу встановлена на двох податливих пластинчастих пружинах 1.



Рисунок 5 – Фото приладу

Фіксування положення воротка 12 і збереження у процесі досліду встановленої довжини маятника порівняння досягається за рахунок сили тертя, що виникає між гумовою шайбою 8, кронштейном 6 і упорною втулкою 9. Тертя осі фізичного маятника незначне за рахунок установки його осі на двох ножових опорах 10.

Оправка 11 з гумовим кільцем, що має зовнішню конусну поверхню, щільно вставляється в отвір деталі, що досліджується (молотка) і своєю віссю встановлюється на опори 10.

## 5 Методика проведення роботи

1 Визначити масу  $m$  кожного зі зношених молотків шляхом зважування їх на вагах ВЛКТ-500, точність зважування до 0,1 г.

2 Визначити центр маси зношених молотків як точку **ц.м.** перетинання двох центральних осей  $AB$  і  $CD$ , положення яких знаходиться по двох рівноважних станах молотка на призмі (рисунок 6). Для цього зношений молоток розташовується на металевій призмі у двох положеннях і олівцем наносяться дві осі  $AB$  і  $CD$ .

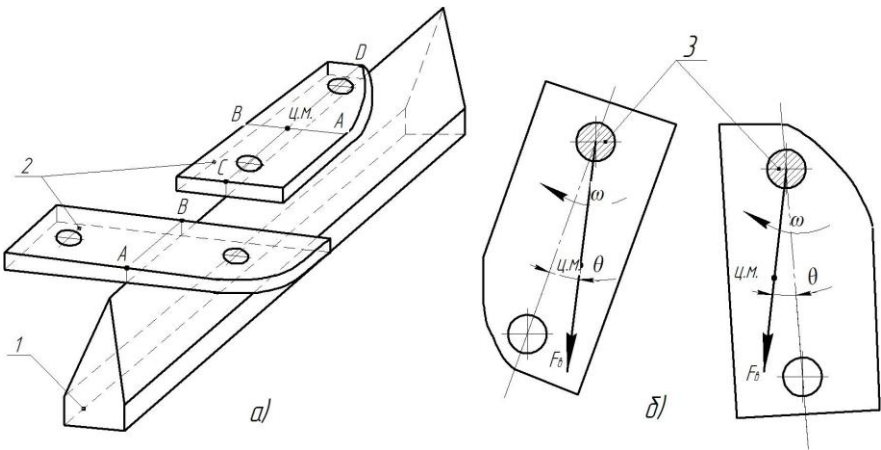


Рисунок 6 – Підготовка молотка до випробувань

а) визначення положення центра маси молотка; б) визначення відхилення молотка від радіально-рівноважного положення через зношування.

1 - призма; 2 - молоток; 3 - вісь підвісу молотка.

3 Визначити за допомогою шкали кутових амплітуд кут  $\Theta$  відхилення зношеного молотка від осі симетрії, установивши молоток на прилад (рисунок 4).

4 Визначити приведену довжина молотка у такий спосіб: молоток встановити за допомогою оправки з віссю 11 на дві ножові опори 10. Легким поштовхом руки деталь приводиться у коливання. Поворотом воротка 12 підбирається така довжину маятника порівняння, при якій він, потрапляючи в резонанс, коливається з максимальною кутовою амплітудою. Приведену довжину  $l_k$  фізичного маятника визначають як довжину маятника порівняння, виміряну масштабною лінійкою з точністю до 1мм.

5 Аналогічно провести випробування молотків з іншими видами та значеннями зносу.

6 Розрахувати момент інерції  $I$  маси молотка відносно осі підвісу та коефіцієнт передачі імпульсів удару  $k_{yi}$  зношеними молотками за формулами (3) і (4).

7 Занести експериментальні та розрахункові параметри молотків у таблицю 2.

Таблиця 1 – Приведені довжини молотків і коефіцієнти передачі імпульсів ударів молотків на їх осі підвісу

Кількість зношених граней	Приведена довжина молотка $l_k$ , мм	Коефіцієнт передачі імпульсу удару, $k_{yi}$	Маса молотка $m$ , кг	Відстань центра маси $s$ , мм	Момент інерції маси $I$ , кг/м <sup>2</sup>
Новий					
Одна					
Дві					
Три					
Чотири					



## 6 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи виконувати правила загальної інструкції з охорони праці, наведеної у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## 7 Контрольні питання

- 1 Які параметри характеризують коливальні рухи тіл?
- 2 Природа загасаючих коливань і їх характеристика.
- 3 Характеристика змушених коливань.
- 4 Фізична сутність явища резонансу.
- 5 Назвіть умови урівноважування молоткового апарата.
- 6 Яке співвідношення параметрів молотка забезпечує попередження передачі імпульсів ударів молотків на осі підвісу?
- 7 Як визначається відстань центра мас молотка?
- 8 Які найбільш доцільні співвідношення радіуса барабана і приведеної довжини молотка.
- 9 Розтлумачте фізичну сутність моменту інерції молотка?
- 10 На який параметр молоткової дробарки впливає кут відхилення зношеного молотка ?

## 8 Тестові завдання

**1) Яку товщину плоских прямокутних молотків рекомендують застосовувати для зернових дробарок?**

- 1 2...3 мм;                      2 4...8 мм;                      3 10...12 мм.

**2) З яких марок сталі рекомендують виготовляти молотки зернових дробарок?**

- 1 сталь 20;                      2 сталь 45;                      3 сталь 65Г.

**3) З якою метою потрібно визначати приведену довжину молотка дробарки?**

- 1 для визначення приведеної маси молотка;
- 2 для визначення моменту інерції маси молотка;
- 3 для визначення допустимого зазору між молотком і декою.

**4) Яке співвідношення  $R_n/l_k$  (радіуса осі підвісу до приведеної довжини) вважається самим вигідним?**

- 1  $R_n/l_k = 1$ ;                      2  $R_n/l_k = 2$ ;                      3  $R_n/l_k = 4$ .



# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

## ВИВЧЕННЯ СКЛАДНОГО РУХУ МОДЕЛІ МОЛОТКА ДРОБАРКИ

**Мета роботи:** Встановити раціональне значення показника лінійного співвідношення діаметра ротора дробарки з шарнірно закріпленими молотками.

Час виконання роботи 4 год.

### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основи теорії конструктивного співвідношення лінійного розміру радіуса підвісу до приведеної довжини молотка;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальної лабораторної установки та іншим обладнанням робочого місця;
- ознайомитись з вимогами техніки безпеки при проведенні роботи;
- провести експериментальні дослідження згідно з методикою проведення роботи;
- обробити результати експерименту та сформулювати висновки;
- скласти та оформити звіт з лабораторної роботи.

### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** основні поняття з теорії стійкості руху молотків дробарки в процесі подрібнення сировини;

- **знати:**

1) рекомендовані конструктивні співвідношення лінійного розміру радіуса підвісу молотка на барабані дробарки до приведеної довжини молотка;

2) механізм коливання шарнірно закріпленого на роторі молотка відносно радіального положення, у якому він утримується відцентровою силою інерції при обертанні барабана;

- **вміти:** проводити налаштування лабораторної установки, користуватися контрольно-вимірними приладами, визначати значення кутів відхилення молотка від його радіального положення.

### 3 Основні теоретичні положення

Одним з ефективних шляхів підвищення якості та зниження енергоємності процесу подрібнення зернових матеріалів є вдосконалення молоткового ротора дробарки на базі дослідження динаміки руху молотка як фізичного маятника у полі відцентрової квазіпружної сили.

У наукових працях М.М. Гернета, В.Д. Земскова, С.В. Мельникова, В.С. Панової та інших дослідників наводиться цілий ряд значень конструктивного співвідношення лінійного розміру радіуса підвісу до приведеної довжини молотка дробарки: **0,25; 2,25; 4; 6,25**.

Зазначено, що вказані значення є однаково прийнятними, оскільки при цьому рух молотка буде стійким. Проте відмічено, що в межах зони стійкості спостерігаються коливання шарнірно закріпленого на роторі молотка відносно радіального положення, у якому він утримується відцентровою силою інерції при обертанні барабана. Відхилення молотка відбувається під дією сили опору матеріалу, який надходить у робочу камеру через завантажувальний отвір (рисунок 1).

Після першого удару молотка частки, що потрапили через завантажувальний пристрій у робочу камеру, одержують ударний імпульс і починають хаотично рухатися у напрямку обертання ротора. Далі відбувається подрібнення розколюванням, стиранням, стисненням і частково – ударом, зі швидкістю меншою, ніж при першому ударі. Тому найбільш сприятливі умови для ударного подрібнення – у зоні завантаження при прямому ударі, коли зернівка рухається перпендикулярно до вектора лінійної швидкості робочої грані молотка.

Удар буде найбільш ефективним, коли молоток у зоні завантаження знаходиться у радіальному положенні відносно осі підвісу і має максимальну відносну швидкість.

Вважаючи, що затухання коливань немає, тому що час між двома послідовними ударами складає 0,02...0,03 с, графічно відносний рух молотка за умови найбільш ефективної взаємодії можна представити у наступному вигляді (рисунок 1):



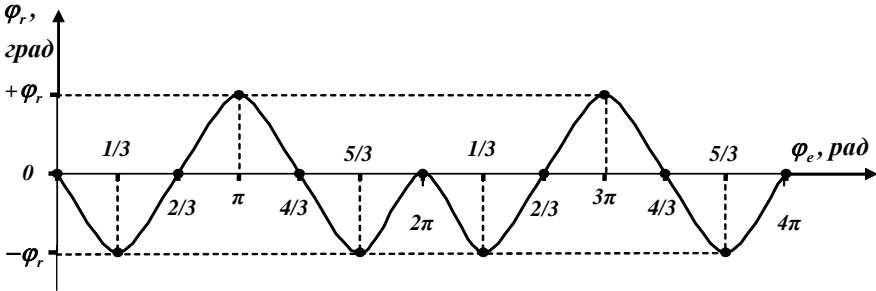


Рисунок 2 – Графічна модель коливань молотка:

$\varphi_r$  – кут відхилення молотка;  $\varphi_e$  – кут повороту ротора.

Залежність періодів обертання ротора і коливань молотка

$$T_e = (N + 0,5)T_r, \quad \text{або} \quad \omega_r / \omega_e = (N + 0,5), \quad (1)$$

де  $T_e$  - період обертання ротора, с;  $T_r$  - період коливань молотка, с;  $\omega_e$  - частота обертання ротора,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\omega_r$  - частота коливань молотка,  $\text{с}^{-1}$ ;

$N$  - ціле число  $0, 1, 2, 3 \dots$

З метою виявлення відомостей щодо значення показника лінійного співвідношення ротора, при якому виконується вимога досягнення максимальної швидкості і мінімальних кутів відхилення молотка в момент початку удару, необхідно провести серію дослідів на спеціально розробленій і виготовленій установці.

#### 4 Оснащення лабораторної роботи приладами та механізмами

Установка (рисунок 3) змонтована на основі 1, яка одночасно містить елементи електричної схеми.

Для проведення дослідів при різних кутових швидкостях привод диска здійснюється двигуном 3 постійного струму (ПЛЮ-7-2 з номінальною потужністю 110 Вт), підключеним через напівпровідниковий блок живлення до мережі перемінного струму. Регулювання числа обертів виконується лінійним автотрансформатором, включеним у ланцюг обмотки ротора двигуна. Для виміру швидкості обертання диска вал двигуна з'єднаний з валом тахогенератора 7, до клем якого підключений прилад, що фіксує частоту обертання диска 4 з маятником.

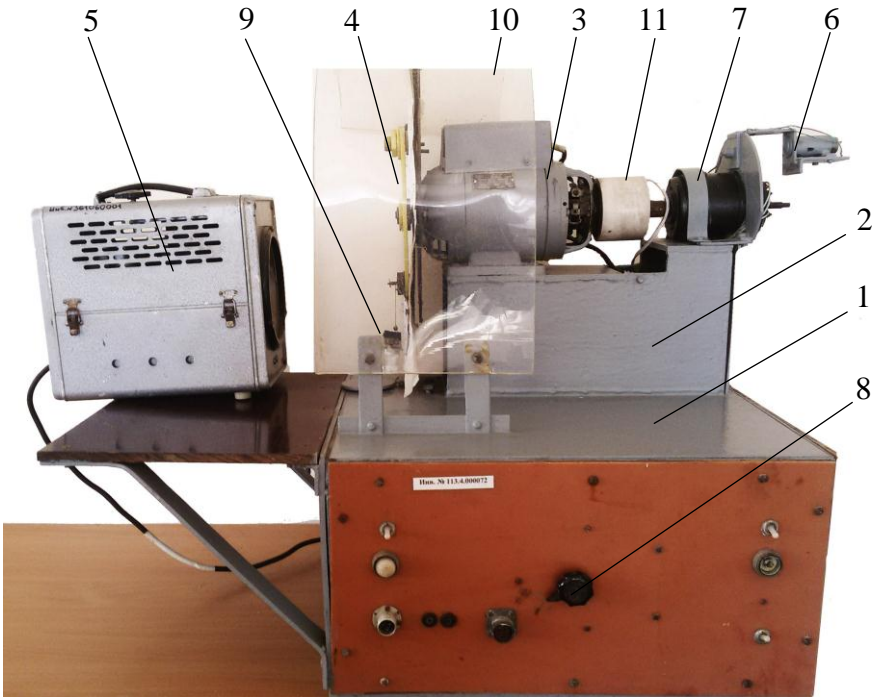


Рисунок 3 – Установка для досліджень коливань моделі молотка

1 - основа; 2 - корпус; 3 - електродвигун; 4 - диск; 5 - тахометр стробоскопічний; 6 - датчик тахометра; 7 - тахогенератор; 8 - регулятор частоти обертання; 9 - пристрій навантаження; 10 - кожух захисний; 11 - механізм вмикання.

Маятник 1 (рисунок 4), що складається зі сталеві кульки та гнучкої капронової нитки, моделює молоток дробарки, який закріплений на диску 6 за допомогою гвинта. Таке закріплення дозволяє легко змінювати довжину маятника і, відповідно, значення показника лінійного співвідношення між радіусом підвісу  $r_o$  і приведеною довжиною молотка  $l_{np}$ .

Вісь підвісу маятника вільно обертається у підшипниках, що встановлені на диску 6. У зв'язку з незначністю опору повороту осі і дуже малими масами нитки і кульки маятник установки з достатнім ступенем точності можна прийняти за математичний, а відстань від осі пальця до центра кульки рівною приведеній довжині молотка.

На диску закріплена шкала кутових амплітуд коливань маятника 2, яка обертається разом з диском 6. Центр цієї шкали сполучений з віссю підвісу маятника, а її нульова відмітка розташована на радіусі диска.

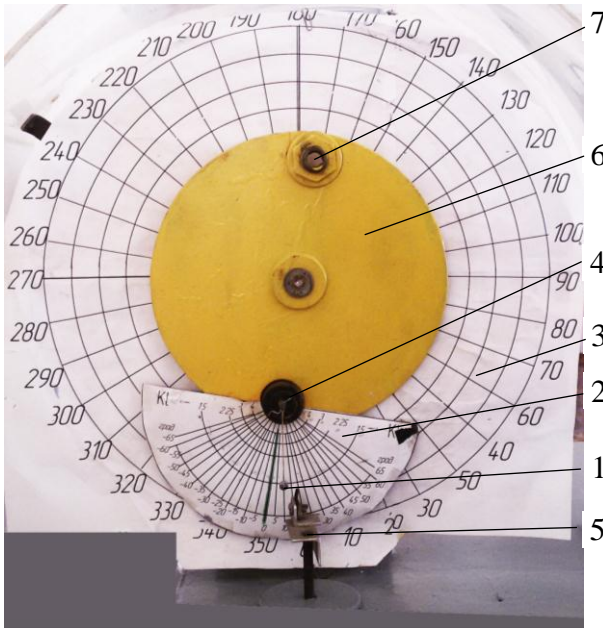


Рисунок 4 – Система шкал експериментальної установки

1- модель молотка (математичний маятник); 2- шкала кутового відхилення моделі молотка; 3- шкала кутового положення осі підвісу молотка; 4- вісь підвісу молотка; 5- механізм створення опору; 6- диск; 7- противага.

Положення шкали 2 і разом з нею осі підвісу маятника в кожен момент часу можна визначати за круговою шкалою 3, закріпленою разом із захисним кожухом 10 нерухомо на корпусі 1 (рисунок 3).

Нульова відмітка нерухомої шкали розташована унизу. При кожному оберті вала контакт механізму вмикання 11, встановлений на рухомому текстолітовому кільці, замикає сталеві пружинні контакти електричного ланцюга стробоскопа 5. Безінерційна лампа стробоскопа при кожному оберті висвітлює на мить диск і маятник, причому вони і шкала представляються спостерігачеві нерухомими.



Це дозволяє відраховувати за нерухомою шкалою 3 кут повороту осі, а за рухомою шкалою 2 – кут відхилення маятника від радіально-рівноважного положення. Механізм вмикання лампи 11 дозволяє вільний поворот втулки на будь-який кут. Обмежується поворот втулки кутом  $360^\circ$  за допомогою гвинта і обмежувача. Поворотом втулки разом із пружинними контактами, здійснюваним при обертанні диска, досягається змінення моменту вмикання лампи стробоскопа і, відповідно, миттєве висвітлення маятника при будь-яких, наперед обраних положеннях його осі підвісу.

Коливання маятника збуджуються механізмом створення опору 5 (рисунок 4), що складається з гумової пластини, об яку при кожному оберті диска вдаряється кулька маятника.

Пластина за допомогою кронштейна закріплена на гвинті, підйом і опускання якого здійснюється поворотом гайки. Регулюванням розташування пластини по висоті досягають ударів кульки по одній і тій же площадці пластини при різній довжині маятника. Ця площадка відзначена зафарбованою плямою. Реакція пластини імітує реакцію порцій матеріалу, що надходять у дробильну камеру.

При русі в продуктово-повітряному шарі робочої камери відбувається безліч зіткнень молотка з твердими частками шару, але вони менш інтенсивні, мають безладний, хаотичний, неперіодичний характер.

Контактування ж молотків з порціями матеріалу, що надходять у камеру, мають періодичний характер, що визначає коливання молотка. Тому дослідження періодичних коливань маятника проводяться з однією пластиною.

На основі теоретичної залежності для визначення відносної швидкості фізичного маятника на осі, що обертається, будується в графічному вигляді динаміка змінення відносної швидкості молотка за один оберт ротора при наступних значеннях показника лінійного співвідношення ротора:  $\kappa_L=1,5$ ;  $\kappa_L=2,25$ ;  $\kappa_L=3$ ;  $\kappa_L=4$  (рисунок 5).

Оскільки при коливанні фізичного маятника швидкість центра мас максимальна при куті відхилення, який наближається до нуля, за характером кривої відносної швидкості досить легко спостерігати змінення відносного зазору.

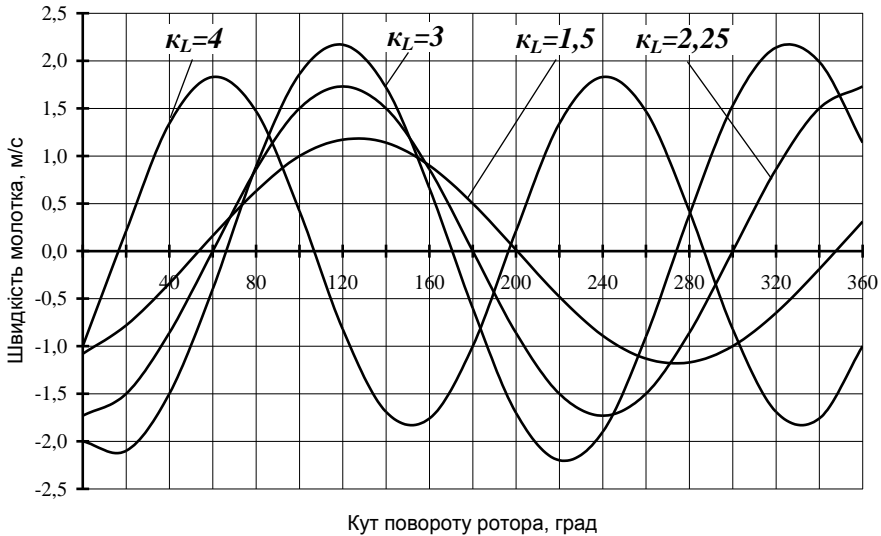


Рисунок 5 – Графіки відносної швидкості молотка

Значення і характер кривих при куті повороту ротора дають змогу визначити напрямок та величину відносної швидкості молотка в момент безпосередньо перед ударом у зоні завантаження.

Характер кривизни графіка  $\kappa_L=1,5$  (рисунок 5) показує, що молоток, пройшовши кут максимального відхилення, рухається у сторону удару (знак "+"), але не встигає досягнути максимального значення швидкості до удару. Крива, побудована за експериментальними даними, підтверджує висновок М.М. Гернета про „хитливість“ руху молотка при значеннях радіуса підвісу, близьких до приведеної довжини молотка (тобто, показник ротора  $\kappa_L=1,5$ ) оскільки, крім визначених, спостерігається ще й „накладення“ коливань з малою амплітудою і високою частотою (вібрація).

Аналогічне дослідження кривої  $\kappa_L=3$  показує, що молоток у момент удару, пройшовши радіальне положення, наближається до максимального кута відхилення, відповідно зменшуючи енергію удару.

Значення кривої  $\kappa_L=4$  після проходження максимального кута відхилення досягає екстремуму, що свідчить про проходження радіального положення, і в момент перед ударом молоток рухається до положення максимального кута відхилення у бік, протилежний напрямку удару.

Аналіз показує, що лише при значенні показника лінійного співвідношення  $\kappa_L=2,25$  вектор відносної швидкості молотка направлений у сторону удару, значення його наближається до максимуму, відповідно, відносний зазор близький до мінімального значення.

## 5 Методика проведення роботи

Зафіксувати кути відхилення фізичного маятника ( $\varphi_r$ ). Для цього використати явище стробоскопічного ефекту під час обертання ротора, для визначення відносної швидкості у коливальному русі при значеннях показника лінійного співвідношення ротора  $k_L = 1,5; 2,25; 3; 4$ .

Відстань  $r_o$  від осі обертання диска до осі підвісу маятника в усіх дослідах цієї серії постійна і дорівнює  $0,09$  м. Довжина  $l_{np}$  маятника послідовно встановлюється рівною  $0,0225; 0,030; 0,040; 0,060$  м, що відповідало значенням показника лінійного співвідношення  $k_L 4; 3; 2,25; 1,5$ .

З метою збереження постійної величини кінетичної енергії кульки при ударі на різних довжинах маятника кутові швидкості обертання  $\omega_e$  диска підбиралися так, щоб величина кінетичної енергії кульки

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{m(r_o + l_{np})^2 \cdot \omega_e^2}{2} \quad \text{була постійною.}$$

Для маятника довжиною  $l_{np} = 0,030$  м прийняте значення кутової швидкості  $\omega_{e30} = 104,7$  рад/с (відповідне  $n = 1000$  об/хв.), також прийняті  $\omega_{e22,5} = 111,7$  рад/с,  $\omega_{e40} = 96,6$  рад/с,  $\omega_{e60} = 83,8$  рад/с,  $\omega_{e90} = 69,8$  рад/с. З маятником довжиною  $l_{3e}=0,040$  м ( $k_L=2,25$ ) досліди проводяться також при кутових швидкостях обертання диска  $\omega_e = 73; 104,7; 125,6; 175,1$  рад/с.

При зазначених значеннях  $\omega_{e30}$  відцентрова сила маси кульки маятника більша за силу ваги в:

$$\frac{m(r_o + l_{np})^2 \cdot \omega_e^2}{2} = \frac{(0,09 + 0,03) \cdot 104,8^2}{9,81} \approx 13,7 \text{ разів.}$$

у зв'язку з чим коливання, викликані зміненнями моменту гравітаційних сил ваги маятника при його обертанні, настільки незначні, що в дослідах, проведених без удару кульки об пластину, відхилення маятника від радіально-рівноважного стану в усіх положеннях осі підвісу є практично непомітним.

Одержані значення відхилень моделі молотка занести в звіт у вигляді таблиці 1

Таблиця 1 – Значення кутів відхилення молотка від радіального положення

Значення $k_L$	Кут повороту диска $\phi_e$ , град.																		
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
1,50																			
2,25																			
3,00																			
4,00																			

Побудувати графіки відносного руху моделі молотка при значеннях показника лінійного співвідношення **4; 3; 2,25; 1,5** за зразком рисунка 5.



Рисунок 6 – До побудови графіка за даними експерименту

## **6 Вимоги безпеки**

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведеної у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## **7 Контрольні питання**

1 Укажіть причину відхилення молотка дробарки від радіального положення у процесі роботи?

2 Чому рух шарнірно закріпленого молотка є складним?

3 Який рух вважається переносним у системі „барабан-молоток“?

4 Який рух вважається відносним в системі „барабан-молоток“?

5 Назвіть найбільш сприятливі умови для ударного подрібнення молотковими дробарками.

6 Опишіть фізичну суть показника лінійного співвідношення ротора.

7 З яких основних частин складається експериментальна установка для дослідження складного руху молотка дробарки?

8 Опишіть методику виконання експериментальної частини даної лабораторної роботи.

9 Знайдіть на графіку відносного руху молотка точки, де молоток приймає радіальне положення.

10 Знайдіть на графіку відносного руху молотка максимальні відхилення молотка.

11 Охарактеризуйте кінематичні властивості молотка в екстремальних точках та радіальних положеннях.

12 Чому в експерименті не враховується маса сталеві кульки маятника?

## **8 Тестові завдання**

1) Яке явище використовується для фіксації кутів відхилення моделі молотка?

1 сингулярний ефект;

2 стробоскопічний ефект;

3 стереоскопічний ефект.

2) При якому значенні показника лінійного співвідношення  $\kappa_L$  вектор відносної швидкості молотка направлений у сторону удару?

1  $\kappa_L=1,5$ ;

$\kappa_L=2,25$ ;

$\kappa_L=3,0$ .

3) З якою метою потрібно визначати приведену довжину молотка дробарки?

1 для визначення приведеної маси молотка;

2 для визначення моменту інерції маси молотка;

3 для визначення допустимого зазору між молотком і декою.

4) Яке співвідношення  $R_n/l_k$  (радіуса осі підвісу до приведеної довжини) вважається самим вигідним?

1  $R_n/l_k = 1$ ;

2  $R_n/l_k = 2$ ;

3  $R_n/l_k = 4$ .

5) З якою метою потрібно визначати момент інерції маси молотка дробарки?

1 для забезпечення виникнення явища резонансу в барабані;

2 з метою забезпечення раціональної динаміки барабана;

3 з метою визначення оптимального пускового моменту барабана.

### Література

1. Ялпачик Ф.Е. Кормодробилки конструкция, расчет / Ф.Е. Ялпачик, Г.С. Ялпачик. Запорожье, Коммунар 1992. - 290 с.

2. Ялпачик Ф.Е. Влияние износа молотков кормодробилки на передачу ударов по осям подвеса. Механизация и электрификация сельского хозяйства. Научно-технический сборник. Выпуск 69. Киев: Урожай, 1989.

3. Лабораторный практикум по процессам і аппаратам пищевых производств. Под ред. А.С. Гинзбурга. Москва. Агропромиздат. 1990. - 256 с.

4. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. / С.В. Мельников. - Л.: Колос, 1978. - 560 с.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

## ОЦІНКА ЯКОСТІ ПОДРІБНЕННЯ СИРОВИНИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СОКІВ

**Мета роботи:** Ознайомитись зі схемою і будовою подрібнювача плодів та лабораторної установки для оцінки однорідності подрібненої маси. Одержати практичні навички визначення степеня подрібнювання плодової маси при виробництві соків відповідно до методики ГОСТ 24283-80.

Час виконання роботи 4 год.

### 1 Порядок виконання роботи

- відповісти на питання викладача, одержати допуск до роботи;
- ознайомитись з принципом дії, будовою та способом регулювання подрібнювача плодів;
- розглянути будову лабораторної установки для визначення ступеню однорідності подрібненої сировинної маси та відпрацювати методику замірів означеного показника;
- відрегулювати подрібнювач на задану степінь подрібнення і подрібнити потрібну для замірів порцію сировини;
- відібрати потрібні проби і провести аналіз подрібненої маси;
- зробити висновки по роботі;
- відповісти на контрольні запитання;
- зарахувати лабораторну роботу у викладача.

### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **посторити:** конспект лекцій, учебну літературу і систематизувати об'єм знань з технології виготовлення плодово-ягідних соків;
- **знати:** основні принципи і способи подрібнення сировини та класифікацію і будову обладнання для подрібнення та протирання сировинної маси, методи визначення показників якості сокової маси.
- **вміти:** налагоджувати дробарку для плодів, користуватися лабораторними приладами, проводити визначення якісних параметрів подрібненої сокової маси, обробляти результати дослідів.

### 3 Загальні передумови до роботи

Одним з перспективних напрямків є виробництво соків з м'якоттю, які одержують гомогенізацією протертих плодів і ягід. Харчова цінність соків з м'якоттю висока, тому що в них зберігається нерозчинний у воді каротин. До цієї ж групи консервів відносяться і згущені соки. Їх виробляють у вигляді екстрактів і концентрованих соків.

Харчова, дієтична і стимулююча дія плодових і ягідних соків тим більша, чим краще збережені їхні натуральні властивості. Самі якісні це марочні соки, виготовлені із плодів спеціальних високоякісних сортів плодових і ягідних культур, районуваних у зоні виробництва соків.

У сучасному виробництві натуральних плодово-ягідних соків застосовують величезну кількість різноманітних технологічних схем, серед яких достатньо велике місце займають технології, які використовують операції подрібнення сировини.

Ці операції у рівній мірі застосовуються як при технологіях з подальшим пресуванням подрібненої маси, так і для технологій по виготовленню соків з м'якоттю, нектарів, нектаринів та ін.

І в першому, і в другому випадку використання операції подрібнення основними показниками її ефективності є такі показники як степінь подрібнення (розмір подрібнених часток), форма частки і рівномірність (однорідність) подрібненої маси (розподіл часток мезги за розмірними групами).

У силу того, що процес дроблення залежить від дуже багатьох причин, часто зовсім випадкових, і він за своїм характером досить складний, на сучасних подрібнюючих машинах, які застосовують на виробництві, дуже важко досягти точних розмірів, певної форми і наперед заданого розподілу за розмірними класами часток роздробленої сировини. Ці машини потребують постійного нагляду і, при необхідності, періодичного настроювання і регулювання.

Таким чином, питання контролю якості подрібненої сировини або ж кінцевого продукту (для соків з м'якоттю та ін.) є досить важливим і дана робота дасть певні знання і навички для проведення лабораторного аналізу за методикою ГОСТ 24283-80.



#### 4 Обладнання для експериментальних досліджень

У якості подрібнювача використовується сконструйований і виготовлений на кафедрі експериментальний зразок дискової дробарки яблук.

Принципова схема подрібнювача і фото загального вигляду приведені на рисунку 1.

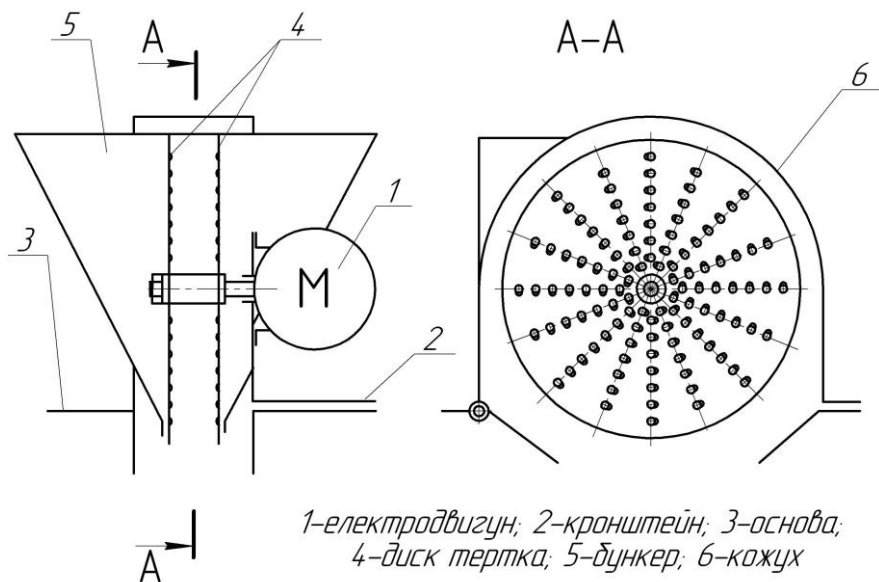


Рисунок 1 – Принципова схема і фото подрібнювача яблук

Приводом подрібнювача служить електродвигун 1, він за допомогою фланця кріпиться до кронштейна 2, який, у свою чергу, закріплений на основі 3.

Дискові ножі-тертки 4 розташовуються безпосередньо на валу електродвигуна і жорстко закріплюються.

Для установки дискових ножів подрібнювача вал двигуна подовжується. У ньому просвердлений осьовий отвір глибиною 25 мм і нарізана різьба під шпильку М10, за допомогою якої на валу закріплюється втулка з дистанційними шайбами для подальшого кріплення дискових ножів. Передача обертаючого моменту від втулки до ножів передається за рахунок сил тертя між шайбами та торцями ножів і залежить від зусилля затягу гайок з пружинними гофрованими шайбами.

Дискові ножі зовнішнім діаметром 250 мм вирізаються з оцинкованої сталі товщиною 1,5 мм. За їх радіусами робляться отвори, подібні отворам на крупній тертці.

На основу подрібнювача встановлюється стійка-кронштейн. Вона служить, з одного боку, відбійником для подрібненої маси, з іншого – опорою для воронкоподібного бункера 5. Це дає додаткові зручності при приведенні механізму в робоче положення, а також при його обслуговуванні.

Подрібнювач має захисний кожух 6, який шарнірно відкидається. Конструкція даної установки виправдовує себе також і з точки зору гігієни праці: по закінченню роботи вона легко розбирається для чищення, миття та сушіння.

Перевірка однорідності подрібнення сировинної маси проводиться на установці, схема якої показана на рисунку 2.

Основними складовими лабораторної установки є рахункова камера 1 і мікроскоп 2 (рисунок 2).

Дослідний матеріал самопливом витікає з накопичувальної ємності 3 по шлангу 4, попадає у рахункову камеру 1 і після проведення заміру зливається у зливну ємність 5. Періодична подача дослідного розчину в рахункову камеру регулюється за допомогою затискачів 6 і 7.

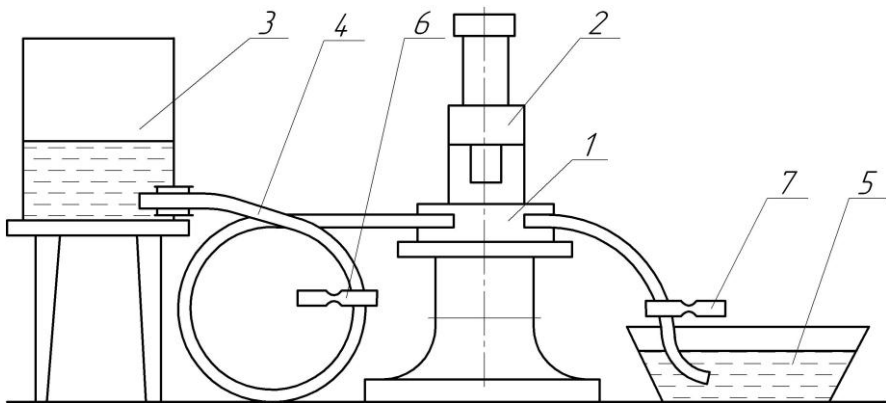


Рисунок 2 – Схема установки для визначення якості подрібнення

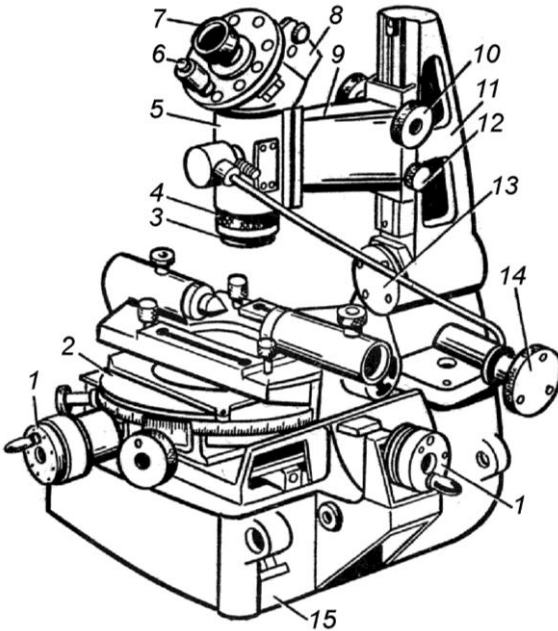
1 - рахункова камера; 2 - мікроскоп; 3 – ємність-накопичувач; 4 - шланг;  
5 - ємність зливна; 6, 7 - затискачі.



Рисунок 3 – Фото мікроскопа з рахунковою камерою

В установці використовується великий інструментальний мікроскоп типу БМИ (рисунок 4), який має універсальне призначення. Цей прилад характеризується великою точністю переміщень столу і універсальністю оптичної системи.

Лита чавунна основа 15 має напрямні, якими на кулькових опорах у двох перпендикулярних напрямках переміщається інструментальний стіл 2. Стіл у



межах 0...25 мм можна плавно переміщати двома мікрометричними гвинтами 1 з маховичками, що мають відповідні лімби. Щоб дещо збільшити межі вимірювання приладу в поздовжньому напрямі між кінцем мікрометричного гвинта і мірильним упором столу вставляють кінцеву міру (плитку) необхідного розміру.

Рисунок 4 – Інструментальний мікроскоп БМИ

Верхню частину столу з предметним склом можна повертати відносно основи для суміщення лінії виміру з напрямом поздовжнього і поперечного переміщення столу.

До основи мікроскопа 15 на осі 13 кріпиться вертикальна стійка 11, якою переміщається кронштейн 9 з тубусом 5. Стійка 11 за допомогою маховичка 14 може нахилитися навколо осі 13 в обидві сторони (вліво і вправо) на кут до  $\pm 12,5^\circ$ .

Мікроскоп фокусують маховичком 10, що переміщає кронштейн 9 угору або донизу.

Після грубого настроювання кронштейн стопорять гвинтом 12. Для більш точного настроювання використовують рифлене кільце 4, при обертанні якого тубус переміщується за напрямними відносно кронштейна.

У нижній частині тубуса встановлений об'єктив 3, у верхній частині – змінна окулярна кутомірна головка з візирним окуляром 7 і відліковим мікроскопом 6. За рахунок змінних об'єктивів і окулярів змінюють збільшення системи.

Мікроскоп має універсальний освітлювач, за допомогою якого можна створювати рівномірне світлове поле, як знизу (через скло предметного столу), так і зверху за допомогою спеціального кільцевого знімного тубуса, розташованого співвісно з об'єктивом (на рисунку тубус не показаний).

Для фотографування об'єктів розташованих на предметному столі, на окуляр мікроскопа можна через перехідну приставку встановлювати фотокамеру.

Проточна рахункова камера установки (рисунок 5) виготовлена за кресленнями стандарту ГОСТ 24283-80\*.

Рахункова камера складається з корпусу 1, виготовленого з прозорого органічного скла і кришки 4 з того ж матеріалу. Стик між корпусом і кришкою ущільнюється прокладкою 3 з силікону.

У порожнину, яка утворюється у зазорі між корпусом і кришкою через один з патрубків 2 і канали в корпусі камери діаметром 4 мм подається суспензія, що досліджується.

Зливання суспензії з камери відбувається через другий патрубок, що має аналогічні розміри.

Кришка притискається до корпусу двома різьбовими з'єднаннями шпилька-гайка 5 і 6 з підкладними шайбами 7.

На поверхню кришки нанесені штрихи-насічки шкали відліку, які утворюють квадрат 4×4 мм.

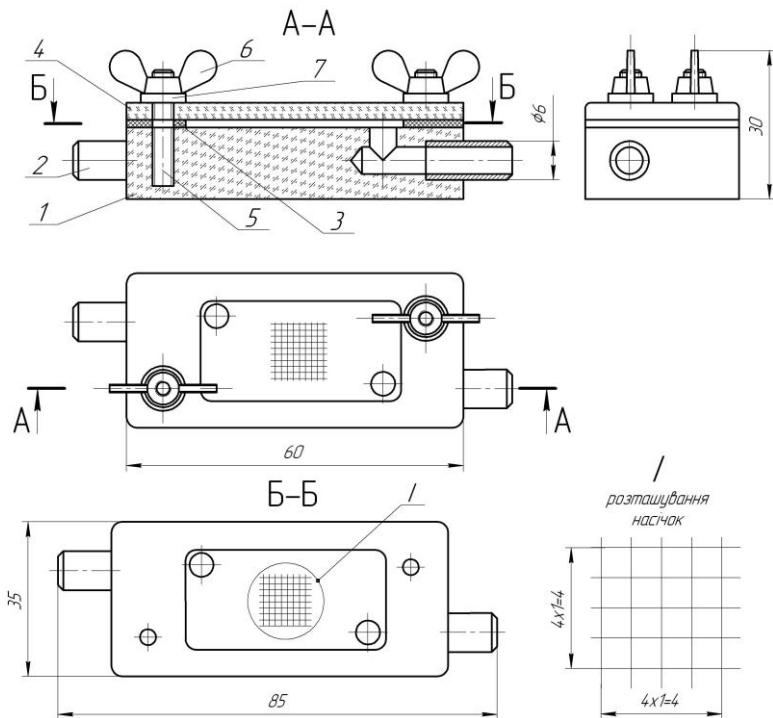


Рисунок 5 – Проточна рахункова камера установки

1 - корпус; 2 - патрубок; 3 - прокладка; 4 - кришка; 5 - шпилька;  
6 - гайка; 7 - шайба.

Для проведення досліджень крім основного обладнання задіяні наступні пристрої, посуд і матеріали:

- ваги лабораторні за ГОСТ 24104-80 з ціною поділки 0,5 мг;
- склянки за ГОСТ 25336-82 типу В місткістю 50 і 2000 мл;
- пристрій для уведення препаратів СТ-12;
- піпетка за ГОСТ 20292-74, місткістю 10 см<sup>3</sup>;
- колба мірна за ГОСТ 1770-74, виконання 1 місткістю 100 см<sup>3</sup>;
- лійка проста конусна з коротким стеблом ГОСТ 23932-79;
- мензурка за ГОСТ 1770-74, місткістю 200 см<sup>3</sup>;
- метиленова синька, масова частка розчину 1%;
- вода дистильована за ГОСТ 6709-72;
- чашка кристалізаційна типу ЧКТ;
- трубка скляна, шланги пластикові прозорі діаметром 6 мм.

## 5 Методика проведення роботи

### 5.1 Методика проведення експериментальної частини

Налаштувати подрібнювач шляхом встановлення відповідних дисків на потрібний розмір частки.

Провести дроблення і відібрати пробу (100 г) подрібненої маси.



Налаштувати подрібнювач на інший розмір частки, подрібнити продукт і відібрати наступну пробу (кількість проб визначає викладач).

Окремі порції продукту помістити в ємності місткістю не менш ніж  $4 \text{ дм}^3$ , долити до них по  $2 \dots 3 \text{ дм}^3$  дистильованої води і вміст ємності ретельно перемішати.

Рисунок 6 – Проба продукту

До одержаної суміші додати близько  $4 \dots 6 \text{ см}^3$  водного розчину метиленової синьки до отримання контрастного зображення часток.

Підготовлену суміш (суспензію) залити в накопичувальну ємність лабораторної установки.

Збовтуючи вміст накопичувальної ємності, звільнити затискачі і пропускати суспензію через рахункову камеру до тих пір, поки бульбашки повітря не зникнуть з поля зору камери, після чого перекрити шланги затискачами і вимірювати розмір часток м'якоті подрібненої маси.

При повторному замірі однієї і тієї ж проби звільнити затискачі і, постійно збовтуючи, пропустити з накопичувача близько 100 мл суспензії, а потім знову затиснути шланги.

Після закінчення кожної серії замірів, перед початком іншої уся систему установки промити спочатку водопровідною, а потім дистильованою водою, камеру розібрати і протерти м'якою ганчіркою і ватним тампоном.

Розмір часток і підрахунок їх кількості проводити послідовно у 16 квадратах рахункової камери (див. рисунок 6). Частка, яка попадає на зовнішні лінії квадрата 4×4 мм, враховується, якщо більша частина лежить у його полі.

За розмір частки приймається найбільша відстань між можливими парами паралельних прямих, що торкаються до контура частки.

## 5.2 Обробка результатів дослідів

Частки подрібненого продукту в залежності від їх розмірів поділяються на три групи:

- до першої групи належать частки розміром більш ніж 300 мкм,
- до другої – більш ніж 150 і до 300 мкм,
- до третьої – від 15 до 150 мкм.

Після визначення розмірів часток підраховується кількість часток, віднесених до кожної групи.

Кількість часток розміром більших за 150 мкм у відсотках визначається за формулою [1]:

$$C_{150} = \frac{n_1 + n_2}{N} 100 \quad (1)$$

$n_1$  - кількість часток першої групи, розміри яких більші за **300** мкм;

$n_2$  - кількість часток другої групи, розміри котрих більші за **150**, але менші за **300** мкм;

$N$  - загальна кількість часток, підрахованих у препараті.

Кількість часток розміром більших за **300** мкм у відсотках визначається за формулою:

$$C_{300} = \frac{n_1}{N} 100 \quad (2)$$

Отримані результати порівнюються з граничними значеннями кількості часток окремих груп, наведених у таблиці 1.



Якість подрібнення повністю задовольняє вимогам діючих стандартів на продукцію, що в даному випадку досліджується, якщо одночасно виконуються наступні нерівності:

$$C_{150} \leq C_{150}^M \quad (3)$$

$$C_{300} \leq C_{300}^M \quad (4)$$

де  $C_{150}^M$  та  $C_{300}^M$  - менші граничні значення кількості у пробі часток розміром понад 150 та 300 мкм;

Якість подрібнення не задовольняє вимогам стандарту на продукцію, якщо виконується хоча б одна з нерівностей:

$$C_{150} \geq C_{150}^{\bar{}} \quad (5)$$

$$C_{300} \geq C_{300}^{\bar{}} \quad (6)$$

де  $C_{150}^{\bar{}}$  та  $C_{300}^{\bar{}}$  - більші граничні значення кількості часток у пробі розміром понад 150 та 300 мкм.

Таблиця 1 – Граничні значення кількості часток окремих груп

Кількість часток	Граничні значення кількості часток %			
	понад 150 мкм		понад 300 мкм	
	$C_{150}^{\bar{}}$	$C_{150}^M$	$C_{300}^{\bar{}}$	$C_{300}^M$
150-169	36,0	24,0	10,3	3,7
170-190	35,5	24,5	10,1	3,9
200-249	35,0	25,0	9,8	4,2
250-290	34,6	25,4	9,5	4,5
300-349	34,2	25,8	9,3	4,7
350-399	33,9	26,1	9,2	4,8
400-499	33,6	26,4	9,0	5,0
500-599	33,2	26,8	8,8	5,2
600-799	32,9	27,1	8,6	5,4
800-999	32,5	27,5	8,4	5,6
1000-1500	32,1	27,9	8,2	5,8

Для спрощення визначення результатів досліджень можна скористатися діаграмою, побудованою на основі таблиці 1 (дані таблиці відображені не повністю).

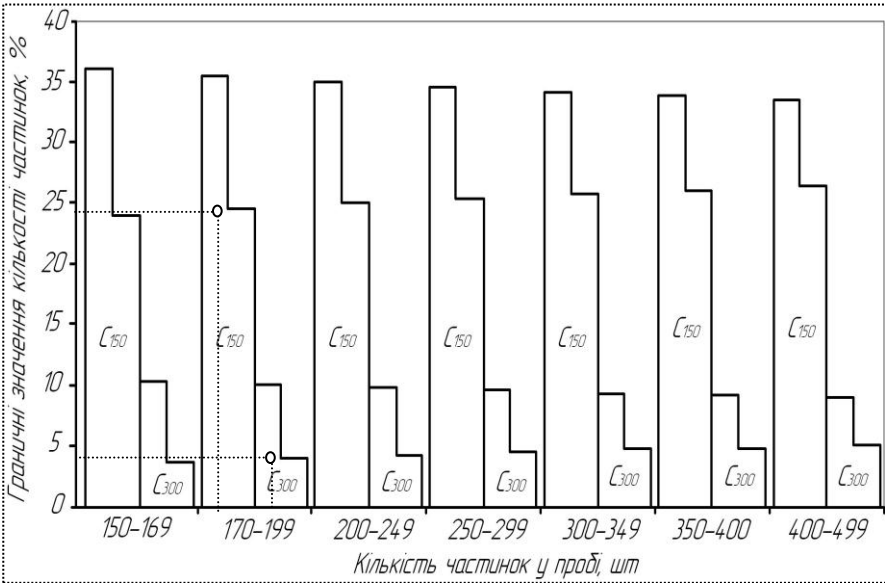


Рисунок 7 – Діаграма для визначення показників якості подрібнення

Якщо не виконується система нерівностей (3) і (4), або ж поєднання нерівностей (5) і (6), потрібно повторити випробування з тією ж пробою і провести розрахунок кількості часток відповідного розміру за формулами (1) і (2), враховуючи результати усіх проведених дослідів.

Одержані результати порівняти з граничними значеннями кількості часток, наведеними в таблиці 1 або діаграмі.

Якщо ж не можна зробити висновок про якість подрібнення при підрахунку більш ніж 1000 часточок, то таку якість подрібненого продукту, що досліджується, слід вважати такою, що не задовольняє вимогам діючого стандарту на конкретну продукцію.

## **6 Вимоги безпеки**

Під час проведення роботи керуватись положеннями інструкції з охорони праці, наведеної в розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## **7 Контрольні питання**

1 Переваги та недоліки того або іншого способу подрібнення, порівняльний аналіз обладнання.

2 У чому полягає основний сенс поняття „якість харчового продукту“, за якими критеріями можна оцінювати це поняття?

3 Як, на вашу думку, впливає однорідність подрібненої маси на подальший хід технологічного процесу та якість кінцевого продукту?

4 З якою метою проводиться контроль якості однорідності сировини для освітлених соків, які виробляють способом пресування?

5 З якою метою проводиться контроль однорідності сокової маси для соків з м'якоттю?

6 За яким принципом працює подрібнювач яблук, задіяний у даній роботі, як можна змінювати степінь подрібнювання?

7 За якими критеріями можна оцінити стабільність і якість роботи подрібнюючого обладнання?

8 На яких основних принципах базується методика визначення якості подрібнення за ГОСТ 24283-80?

9 Для визначення якості подрібнення яких продуктів, на вашу думку, можна застосовувати наведену методику?

10 У якому випадку, користуючись даною методикою, можна констатувати, що якість подрібненого продукту, який досліджується, не задовольняє вимогам стандарту на конкретну продукцію?

## **8 Тестові завдання**

**1 За рахунок якого виду впливу робочого органу на продукт працює дробарка, яка використовується в даній роботі?**

а) стиск;

б) удар;

в) різання.

**2 Укажіть, який з наведених процесів забезпечує одержання дрібнодисперсних часточок у соку з м'якоттю**

- а) гомогенізація;      б) протирання;      в) дроблення.

**3 З якою метою при підготовці сокової м'якоти до досліджень у рахунковій камері в м'якоть добавляють метиленову синьку?**

- а) для розкислювання суспензії, що досліджується;  
б) для підфарбовування суспензії, що досліджується;  
в) для кращого проходження по шлангах установки.

**4 Який вираз свідчить, що якість подрібнення повністю задовольняє вимогам діючих стандартів на продукцію?**

- а)  $C_{150} \geq C_{150}^{\bar{b}}$ ;      б)  $C_{150} \leq C_{150}^M$ ;  
в)  $C_{300} \geq C_{300}^{\bar{b}}$ .

**5 На скільки груп поділяють частки подрібненого продукту в залежності від їх розмірів?**

- а) дві;      б) три;      в) чотири.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- ГОСТ 24283-80\* Консервы гомогенизированные для детского питания. Метод определения качества измельчения. Изд. стандартов, 1989. - 9 с.
- Технология пищевых продуктов: Учебник / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Украинца. - К.: Издательский дом Аскания, 2008. - 736 с.
- Домарецький В.А. Загальні технології харчових виробництв : підруч. / В. А. Домарецький, П. Л. Шиян, М. М. Калакура та ін.- К.: Університет „Україна“, 2010. - 814 с.
- Дацишин О.В. Механізація переробки і зберігання плодовоовочевої продукції: / О.В. Дацишин, О.В. Гвоздев, Ф.Ю. Ялпачик та ін. - К.: Мета, 2003. - 288 с.
- Шобингер У. Плодово-ягодные и овощные соки, научные основы и технологии / У Шобингер - СПб.: Профессия, 2004. - 640 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ НА ПЛУНЖЕРНІЙ ГІДРАВЛІЧНІЙ УСТАНОВЦІ

**Мета роботи:** 1) розглянути принцип роботи і будову експериментальної установки для дослідження процесу пресування; 2) експериментально визначити основні параметри процесу пресування різних матеріалів, встановити залежності процесу; 3) побудувати графік індикаторної кривої.

Час виконання роботи 4 год.

#### **1 Порядок виконання роботи**

- ознайомитись з будовою та принципом дії експериментальної установки для пресування;
- розрахувати основні параметри процесу пресування;
- провести експериментальні дослідження процесу пресування;
- провести тарування динамометричної скоби установки;
- розраховувати коефіцієнти ущільнення і порозності;
- побудувати графік індикаторної кривої;
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### **2 Завдання для самопідготовки**

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

**- повторити:**

- 1) загальні положення теорії процесу пресування; 2) відомості про основні способи і машини для обробки матеріалів тиском;

**- знати:**

- 1) область застосування процесів пресування на переробних та харчових підприємствах;

- 2) класифікацію пресів та їх загальну будову.

**- вміти:** проводити налаштування експериментальної установки, користуватися контрольно-вимірювальними приладами, проводити визначення основних аналітичних залежностей за темою дослідження, будувати графічні залежності за результатами досліджень.

### 3 Загальні відомості з процесу пресування

Пресування, його відносять до обробки матеріалу тиском, являє собою ущільнення матеріалу у замкненому просторі під впливом зовнішнього тиску до отримання монолітного брикету з густиною, при якій тіло не може самовільно руйнуватися.

Обробка матеріалів тиском у харчовій промисловості застосовується для виконання наступних процесів:

- обезводнення під тиском – застосовується у ряді галузей харчової промисловості: в цукровому виробництві для віджимання води з бурякового жому, соку з цукрового очерету, в жировому виробництві для виділення рослинної олії, у виробництві соків для виділення соку з ягід і плодів, для виробництва макаронів;

- брикетування – використовують для отримання брусків пресованого матеріалу прямокутної або циліндричної форми; брикетування застосовується в цукровому виробництві, для отримання брикетів бурякового жому і цукру-рафінаду, у виробництві харчових концентратів, комбікормів, утилізації відходів;

- таблетування і гранулювання; таблетки і гранули мають менші розміри в порівнянні з брикетами; в промисловості випускають гранульовані чай, каву, харчові концентрати, цукерки та ін.;

- формування пластичних матеріалів – застосовується в хлібопекарському, кондитерському, макаронному, комбікормовому та інших виробництвах для надання виробу заданої форми.

Фактори, які визначають процес пресування, діляться на дві групи.

**Перша група** – фактори, які характеризують фізико-механічні властивості продукту:

- а) модуль пресування – спроможність продукту до ущільнення при прикладанні до нього зовнішнього тиску за відсутності втрат тиску на тертя;

- б) коефіцієнт бічного тиску – відношення бічного тиску зі сторони пресованого матеріалу до діючого вертикального тиску пресування;

- в) вологість, температура, гранулометричний склад матеріалу.

*Друга група* – фактори, які характеризують умови пресування:

- а) питомий тиск пресування;
- б) тертя продукту об пресовий інструмент;
- в) форма брикету, що пресується, і його розміри;
- г) режими пресування;
- д) кількість поверхонь брикету, які безпосередньо сприймають тиск.

Об'єм брикету  $V$  складається з трьох частин (рисунок 1):

- перша частина має об'єм  $V_k$  і висоту  $h_k$ , заповнена сухою речовиною;
- друга частина має об'єм  $V_p$  і висоту  $h_p$ , заповнена рідкою фракцією;
- третя частина має об'єм  $V_2$  і висоту  $h_2$ , заповнена газоподібною фракцією.

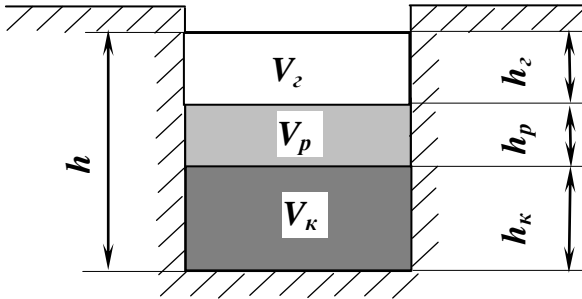


Рисунок 1 – Схема структури брикету

Параметри процесу пресування:

Коефіцієнт ущільнення – відношення повного об'єму брикету  $V$  до об'єму сухої речовини.

$$\beta = \frac{V}{V_k} = \frac{h}{h_k}, \quad (1)$$

Коефіцієнт порозності – відношення суми об'ємів рідкої і газоподібною фракцій до об'єму сухої речовини

$$\varepsilon = \frac{V_p + V_2}{V_k}, \quad (2)$$

Коефіцієнт ущільнення і коефіцієнт порозності зв'язані між собою наступною залежністю

$$\varepsilon = \beta - 1, \quad (3)$$

При постійній площі брикету коефіцієнт ущільнення визначається за виразом:

$$\beta = \frac{\gamma}{\gamma_k} = \frac{h}{h_k}, \quad (4)$$

де:  $\gamma$  - об'ємна маса спресованого брикету;

$\gamma_k$  - об'ємна маса скелета речовини.

Рівняння „ідеального пресування“ (при відсутності бокового розширення і втрат тиску на тертя) має наступний вигляд:

$$\psi \cdot l g \frac{p}{p_0} = \beta_0 - \beta, \quad (5)$$

де:  $p$  і  $p_0$  - відповідно кінцевий та початковий тиск стискання, Па;

$\beta$  і  $\beta_0$  - коефіцієнти ущільнення кінцевого та початкового стискання;

$\Psi$  - модуль пресування, визначається експериментально.

Робота пресування на один хід плунжера визначається за наступною закономірністю:

$$A = \int_{h_0}^{h_k} S \cdot p \cdot dh, \quad (6)$$

де:  $S$  - площа поперечного перетину матриці, м<sup>2</sup>;

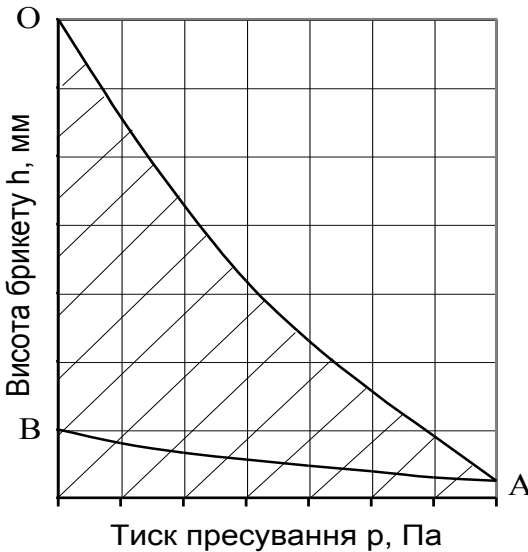
$h_0$  і  $h_k$  - початкова і кінцева висота брикету, м;

$p$  - тиск пресування, Па.

Ступінь ущільнення продукту при пресуванні залежить від питомого тиску пресування, який є різним за висотою брикету, отже, і відносні ущільнення відрізняються у різних шарах брикету за його висотою. Чим вищий тиск, тим більший ступінь ущільнення продукту. Брикет є найбільш ущільненим безпосередньо під плунжером і якнайменш ущільненим біля дна матриці.

Основна характеристика процесу пресування – залежність між приростом тиску і зменшенням коефіцієнта ущільнення речовини.





Графічно ця залежність виражається в індикаторній кривій (рисунок 2), яка встановлює зв'язок між висотою брикету в матриці і тиском пресування.

Крива пресування ОАВ складається з гілки навантаження ОА – стиснення речовини під зовнішнім тиском і гілки розвантаження АВ – звільнення стиснутого брикету гілки від прикладеного тиску.

Рисунок 2 – Індикаторна крива пресування

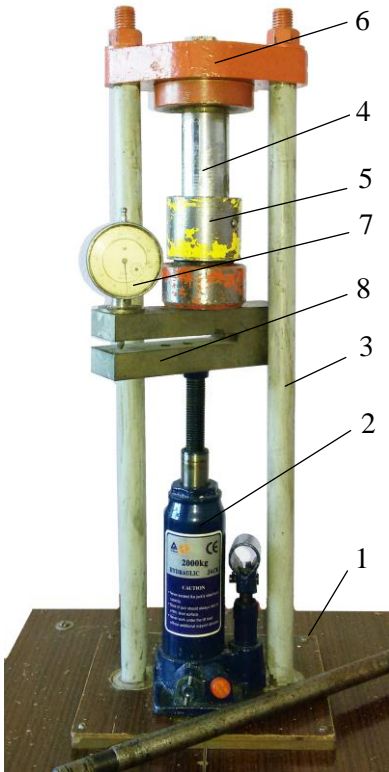
Індикаторна крива є важливою характеристикою процесу і дозволяє отримати дані, необхідні для розрахунку пресів і пресового інструменту.

#### 4 Оснащення робочого місця лабораторної роботи

- 1 Експериментальна установка для пресування.
- 2 Ваги лабораторні ВНЦ-2.
- 3 Штангенциркуль ШЦ-125.
- 4 Зразки матеріалу для пресування.
- 5 Обчислювальна техніка, креслярське приладдя.

Експериментальна установка (рисунок 3) для дослідження процесу пресування складається з 3-х або 5-ти тонного гідравлічного домкрата 8, встановленого на основу преса 1. На основі кріпляться дві штанги 2, на яких закріплений опорний фланец (траверса) 6.

Зусилля пресування визначається за динамометричною пружинною скобою 8, оснащеною індикаторною головкою 7.



Між опорним фланцем установки і пружинною скобою встановлюється пресовий блок, який складається з матриці 5 і пуансона 4.

Динамометрична скоба відтарована і за даними тарування складений тарувальний графік залежності зусилля пресування від деформації пружини (показання індикатора).

Дана установка комплектується пресовими блоками з різноманітними конфігураціями і розмірами матриці і пуансона.

Рисунок 3 – Експериментальна установка для дослідження пресування:

1 - основа преса; 2 - домкрат; 3 - стійка; 4 - пуансон (поршень); 5 - матриця; 6 - опорний фланець; 7 - індикаторна головка; 8 - динамометрична скоба.

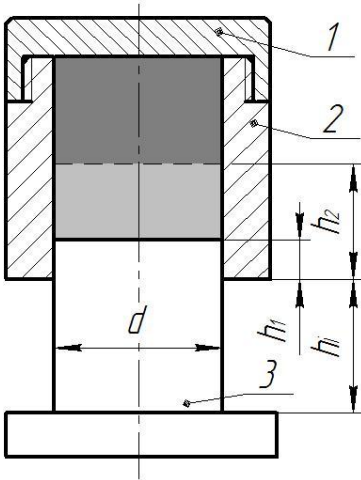
## 6 Методика проведення роботи

1) Визначити геометричні параметри матриці і плунжера (діаметр матриці і хід плунжера,  $d$ ,  $h$ ). Штангенциркуль 0...125мм.

2) Відважити потрібну наважку матеріалу, підготовану до пресування,  $G_r$ . Ваги ВНЦ-2.

3) Заповнити матрицю дослідним матеріалом, злегка ущільнити вручну плунжером. Заміряти відстань від поверхні матеріалу до краю матриці,  $h_1$ . Штангенциркуль 0...125мм.

4) Зібрати матрицю з плунжером, встановити на прес, заздалегідь поставивши між плунжером і штоком домкрата динамометричну скобу з індикатором. Вибрати зазори злегка піднявши шток гідродомкрата угору.



5) Встановити стрілку індикатора динамометричної скоби на нуль і заміряти відстань між кромкою плунжера і кромкою матриці,  $h_i$ .

6) Провести пресування (ущільнення брикету) ступінчасто збільшуючи зусилля на плунжері пресового пристрою.

Рисунок 4 – Схема пресового блоку  
1 - кришка; 2 - матриця; 3 - плунжер.

На кожному ступені заміряти і фіксувати покази індикатора, а також скорочення відстані  $h_i$ . Штангенциркуль 0...125мм. Тарувальний графік пружини приведений в додатку А.

7) Після завершення дослідів розібрати пресовий пристрій і заміряти відстань від кромки матриці до спресованого брикету  $h_2$ .

8) Зважити отриманий брикет  $G_b$ . Ваги ВНЦ.

9) Отримані результати експерименту і розрахункові дані занести в таблиці 1 і 2.

### 5 Вимоги техніки безпеки

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведеної у розділі „Загальні вимоги безпеки“. Під час проведення дослідів звертати увагу на дотримання співвідношення силових елементів преса.

Таблиця 1 – Основні параметри пресового пристрою

Діаметр плунжера $d$ , мм	Хід плунжера, $h$ , мм	Маса наважки, $G_n$ , г	Відстань		Маса брикету, $G_b$ , г	Площа поршня, $S$ , мм <sup>2</sup>
			$h_1$ мм	$h_2$ мм		

Таблиця 2 – Експериментальні дані дослідів

Номер досліду	1	2	3	4	5	6	7	8
Показання індикатора, мм								
Відстань $h_i$ , мм								
Зусилля пресування, $F$ , Н								

## 6 Обробка результатів експерименту

6.1 Визначити висоту брикету:

- до пресування, мм  $h'_0 = h - h_1$ ;

- після пресування, мм  $h''_0 = h - h_2$ ;

6.2 Визначити коефіцієнт ущільнення  $\beta$  матеріалу, що пресується

$$\beta = \frac{h'_0}{h''_0}. \quad (7)$$

6.3 Визначити коефіцієнт порозності

$$\varepsilon = \beta - 1. \quad (8)$$

6.4 Розрахувати проміжні значення висоти брикету  $h_{0i}$ , мм і дані занести в таблицю 3.

$$h_{0i} = h'_0 - h_i. \quad (9)$$

6.5 За тарувальним графіком (рисунок 5) динамометричної скоби визначити зусилля пресування  $F$ , Н, дані занести в таблицю 2.

6.6 Визначити тиск пресування для усіх проміжних точок досліду,  $p_i$ , Па за виразом:

$$p_i = \frac{F_i}{S} = \frac{4F_i}{\pi \cdot d^2}, \quad (10)$$

де  $p_i$  - поточне значення тиску, Па;  $F_i$  - поточне зусилля пресування, Н;  $d$  - діаметр плунжера, мм;  $S$  - площа плунжера пресового пристосування, мм<sup>2</sup>.

Отримані розрахункові дані занести в таблицю 3.

Таблиця 3 – Параметри індикаторної кривої за результатами проведених дослідів

Номер досліду	1	2	3	4	5	6	7	8
Висота брикету, $h_0$ , мм								
Тиск пресування, $p_i$ , Па								

6.7 На міліметровому папері, користуючись даними таблиці 3, побудувати графік індикаторної кривої процесу пресування.

6.8 Оформити звіт з роботи згідно з переліком етапів, рекомендованих у розділі „Загальні організаційно-методичні передумови“.

### 7 Контрольні питання

1 У яких галузях харчової та переробної промисловості застосовують процес пресування?

2 У чому відмінність між обезводненням і брикетуванням продукту?

3 Поясніть суть середнього коефіцієнта ущільнення і від яких параметрів процесу він залежить?

4 З урахуванням яких параметрів визначають роботу пресування?

5 Якими способами можна створити зусилля пресування?

6 При виробництві яких харчових продуктів їх та їх складові піддають пресуванню?

7 Яке обладнання застосовують при обробці продуктів пресуванням?

8 Поясніть принцип дії гідравлічного преса, дайте аналіз його переваг та недоліків.

### 8 Тестові завдання

1) За якою формулою визначають коефіцієнт ущільнення матеріалу при пресуванні?

$$1 \lambda = D_n / d_k ;$$

$$2 \varphi = S_0 / S ;$$

$$3 \beta = \frac{V}{V_k} = \frac{h}{h_k} ;$$

$$4 \varepsilon = (V_{жс} - V_p) / V_k .$$

**2) Які основні типи пресів застосовують у харчовій та переробній промисловості?**

- 1 гідравлічні і механічні;                      2 тільки гідравлічні;  
3 ротаційні та відцентрові;                4 тільки механічні.

**3) Укажіть, який технологічний процес не відноситься до процесів обробки продукту тиском**

- 1 таблетування;                                2 брикетування;  
3 барботування;                                4 пресове гранулювання.

**4) За якою формулою визначають коефіцієнт порозності при пресуванні?**

- 1  $\lambda = D_n/d_k$  ;                                2  $\varepsilon = (V_p - V_z)/V_k$  ;  
3  $\beta = \frac{V}{V_k} = \frac{h}{h_k}$  ;                                4.  $\varphi = S_0/S$  .

**5) У яких координатах будується індикаторна діаграма процесу пресування:**

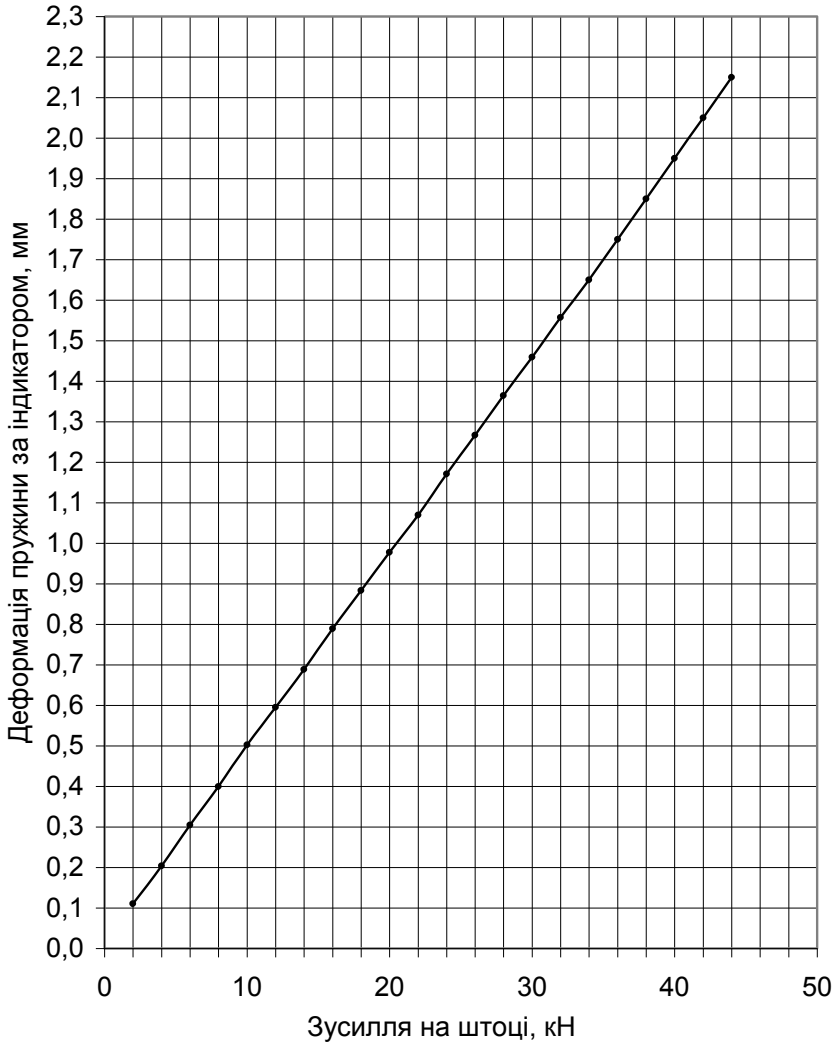
1. тиск-висота брикету;                      2. тиск-ширина брикету;  
3. тиск-сила пресування;                    4. тиск-щільність брикету.

### **Література**

1. Стабников В.Н., Процессы и аппараты пищевых производств. / В.Н. Стабников, В.Д. Попов. М.: Пищевая промышленность, 1976. - 663с.
2. Кавецкий Г.Д.. Процессы и аппараты пищевых технологий. / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев М.: Колос, 2000. – 551 с.
3. Горбатюк В.М.. Процессы и аппараты пищевых производств. / В.М. Горбатюк. М.: Колос. 1999–335 с.
4. Основы расчета и конструирования машин и автоматов пищевых производств. Под ред. А.Я. Соколова. М.: Машиностроение, 1969. - 639 с.
5. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. / С.В. Мельников. – Л.: Колос, 1978. - 560 с.

Додаток А  
(довідковий)

Рисунок А1 Тарувальний графік динамометричної пружини



# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ СИСТЕМ НА ТАРИЛЧАСТОМУ СЕПАРАТОРІ

**Мета роботи:** експериментальним шляхом визначити параметри розділення неоднорідної рідини (молока); визначити достовірність експериментальних значень показників розділення шляхом порівняння їх з розрахунковими.

Час виконання роботи 4 год.

### 1 Порядок виконання роботи

- ознайомитись з основними положеннями теорії розділення неоднорідних рідких середовищ;
- ознайомитись з будовою та принципом дії лабораторного обладнання для проведення роботи;
- провести експериментальні дослідження процесу сепарації молока та визначення його жирності;
- обробити результати експериментів;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- скласти звіт з виконаної лабораторної роботи.

### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

**- повторити:**

1) загальні положення теорії процесу сепарування; 2) відомості про способи і обладнання для розділення неоднорідних систем;

**- знати:**

1) область застосування процесів розділення неоднорідних систем у переробному і харчовому виробництвах; 2) класифікацію сепаруючого обладнання;

**- вміти:** проводити налаштування експериментального обладнання, користуватися контрольно-вимірювальними приладами, проводити і обробляти лабораторні дослідження.



### 3 Основні теоретичні положення

Неоднорідними, або гетерогенними називають системи, що складаються, як мінімум, з двох фаз: дисперсної (внутрішньої), яка звичайно знаходиться у тонкоподрібненому стані, і дисперсійної (зовнішньої), що оточує часточки дисперсної фази. До неоднорідних систем відносять:

- суспензії (складаються з рідкої (дисперсійної) і твердої дисперсної фази). У залежності від розмірів зважених твердих часток вони діляться на грубі, тонкі і колоїдні;

- емульсії – складаються з двох рідких фаз, що не розчиняються одна в одній, розміри часток дисперсної фази можуть коливатися у значних межах. Під дією гравітаційної сили емульсії звичайно розшаровуються, однак тонкі емульсії стають усталеними і не розшаровуються достатньо тривалий час;

- піни складаються з рідкої дисперсійної і газової дисперсної фази. За своїми властивостями піни близькі до емульсій;

- пил і дим включає газову дисперсійну і тверду дисперсну фази. Пил утворюється звичайно при дробленні, змішуванні і транспортуванні твердих матеріалів. Дими з розміром твердих часток 0,3...5 мкм утворюються при горінні.

- тумани складаються з газової дисперсійної і твердої дисперсної фаз. Тумани утворюються при конденсації парів, розмір рідких крапель 0,3...3 мкм.

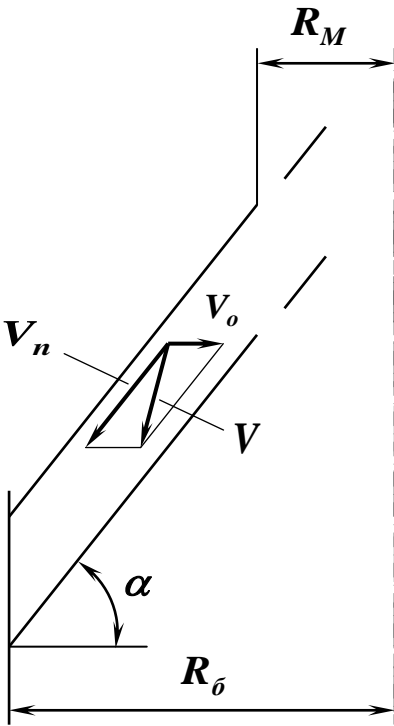
Пил, тумани і дими являють собою аерозолі.

У виробничих процесах харчової та переробної промисловості процес розділення неоднорідних систем використовується достатньо широко. Це освітлення соку, пивного суслу і вина, розділення утфелю, обробка молока, очищення газів.

Основні методи розділення неоднорідних систем це осадження, фільтрування, центрифугування. Осадження – процес розділення рідких і газових неоднорідних систем під дією гравітаційних сил, сил інерції (відцентрової сили) або сил електричного поля.

При розділенні молока одержуються вершки (жир) і знежирене молоко (плазма або молочний оброт).

Жир міститься у молоці у вигляді маленьких кульок діаметром не більш 1...10 мкм. Оскільки різниця густини плазми і жиру незначна (1030,6 і 911,9 кг/м<sup>3</sup> при 30 °С) і розміри жирових кульок маленькі, то в умовах природного відсмоктування вони спливають дуже повільно. Для прискорення та поліпшення цього процесу і використовують тарілки розділових сепараторів.



Під час роботи сепаратора молоко подається безперервним потоком у барабан, який швидко обертається. Під час руху молока в барабані вершки рухаються до осі обертання барабана і через спеціальний регулювальний отвір виводяться назовні у приймач. Знежирене молоко з більшою густиною відходить до периферії і також відводиться через інший отвір в інший приймач.

Механічні домішки відкидаються до стінок барабана і осідають на ньому щільним шаром. У міжтарільчастому проміжку жирові кульки рухаються разом з потоком молока униз до периферії тарілок із швидкістю потоку (рисунок 1).

Рисунок 1 – Схема руху жирової кульки в міжтарільчастому зазорі

$$V_n = \frac{M}{2\pi \cdot R \cdot h \cdot z}, \quad (1)$$

де  $V_n$  - швидкість потоку, м/с;  $M$  - продуктивність сепаратора, м<sup>3</sup>/с;  $R$  - радіус розрізу, м;  $h$  - відстань між тарілками, м;  $z$  - число тарілок.

Одночасно під дією відцентрових сил жирові кульки рухаються до осі обертання барабана із швидкістю, визначеною за рівнянням Стокса:

$$V_o = \omega^2 \cdot R^2 \cdot d^2 \cdot \frac{\rho_m - \rho_{жс}}{18 \cdot \mu}, \quad (2)$$

де  $d$  - діаметр жирової кульки, м;  $\rho_m, \rho_{жс}$  - густина плазми і жиру, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  - в'язкість плазми, П·с;  $R$  - радіус обертання, м;  $\omega$  - кутова швидкість обертання барабана, рад/с;  $V_o$  - швидкість жирової кульки, м/с.

Густина плазми молока  $\rho_m$  і густина жиру  $\rho_{жс}$ , а також в'язкість молока  $\mu$  залежать від температури і можуть бути визначені з рівняння (для температур 15...75 °С).

$$\frac{\rho_m - \rho_{жс}}{\mu} = 2900 \cdot t \quad (3)$$

де  $t$  - температура молока, °С.

З урахуванням цього рівняння швидкість осідання жирових кульок буде визначатися більш простою залежністю

$$V_o = 161 \cdot \omega^2 \cdot R \cdot d^2 \cdot t \quad (4)$$

або

$$V_o = 6400 \cdot n^2 \cdot R \cdot d^2 \cdot t \quad (5)$$

де  $n$  - частота обертання барабана, об/с.

При відстоюванні, коли діє прискорення вільного падіння, швидкість осідання визначається з рівняння

$$V_o = 1580 \cdot d^2 \cdot t \quad (6)$$

Абсолютна швидкість руху жирових кульок дорівнює геометричній сумі двох швидкостей  $V_n$  і  $V_o$ . По мірі видалення жирових кульок від осі обертання швидкість  $V_o$  зростає, а швидкість  $V_n$  зменшується, тому що із збільшенням  $R$  збільшується площа поперечного перетину потоку.

Продуктивність сепаратора визначають виходячи з умови виділення жирової кульки мінімальних розмірів.

Жирова кулька буде виділена з молока за умови, що за час руху в потоці молока до краю тарілок вона встигне перейти в шар вершків під дією швидкості осадження, тобто перетнути потік молока між тарілками на поверхні нижньої тарілки, де швидкість потоку змінюється за параболічними законами і дуже мала.

Продуктивність сепаратора визначається з рівності

$$W = 48 \cdot 10^6 \cdot \beta \cdot n^2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot (R_{\beta}^3 - R_m^3) \quad (7)$$

де  $M$  - продуктивність сепаратора, м<sup>3</sup>/год.;  $\alpha$  - кут підйому тарілки (45°...60°);  $R_{\beta}, R_m$  - більший і менший радіуси тарілки, м;  $\beta$  - технологічний ККД сепаратора (ступінь використання робочого об'єму барабана, частину якого займають вершки) ( $\beta = 0,5...0,7$ ).

Температуру молока при сепарації приймають від 36 °С до 40 °С. Діаметр розрахункової жирової кульки – 1,3...1,5 мкм. Вміст жиру в об'єкті 0,04...0,06 %. Густина молока визначається молочним ареометром при температурі 15...25 °С.

#### **4 Оснащення робочого місця лабораторної роботи**

*Обладнання робочого місця*

Сепаратор відцентровий молочний „Мотор Січ СЦМ-80“;

Центрифуга лабораторна СМ-6МТ;

Прилад для вимірювання потужності електродвигуна К-50.

*Оснастка і прилади*

Ареометр для вимірювання густини молока. Термометр для визначення температури молока. Прилад для визначення в'язкості молока. Мірні ємності для молока. Пристрій для дозування сірчаної кислоти. Пристрій для дозування ізоамілового спирту. Рукавички гумові.

#### **Сепаратор молочний „Мотор Січ СЦМ-80“**

Сепаратор відцентровий молочний з електричним приводом, призначений для розділення цільного молока на вершки і знежирене молоко з одночасним очищенням від забруднення.

Сепаратор (рисунок 2) складається з корпусу 8 з електродвигуном 9, барабана 5, приймача вершків 6, поплавця 4, камери поплавця 3, молокоприймача 2, пробки 1.

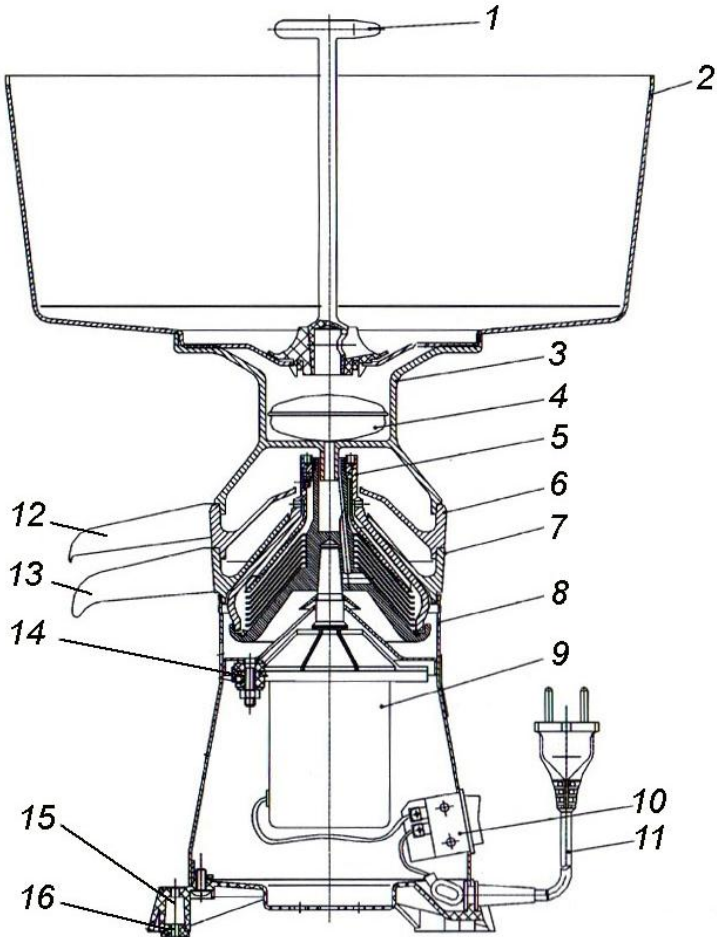


Рисунок 2 – Сепаратор тарілчастий молочний „Мотор-Січ СЦМ 80“

1 - кран; 2 - молокоприймач; 3 - поплавкова камера; 4 - поплавок;  
 5 - барабан; 6 - приймач вершків; 7 - приймальник обрату; 8 - корпус;  
 9 - електродвигун; 10 - вимикач; 11 - шнур живлення; 12 - вихід вершків;  
 13 - вихід обрату; 14 - опора амортизатор; 15 - втулка опори; 16 - опора.

Електродвигун 9 кріпиться до корпусу 8 на трьох шпильках з гайками, що мають пристрої проти відкручування. Для зменшення динамічних навантажень у момент пуску двигуна і запобігання сходу барабана 5 з конусного хвостовика приводного вала у фланець електродвигуна вставлені амортизатори – втулки 14. На корпусі 8 встановлений вимикач 10 і шнур електроживлення 11.

Основний робочий орган – барабан (рисунок 3). У барабані під дією відцентрових сил відбувається розділення молока на вершки і обрат. Барабан складається з тарілотримача 1 з набором алюмінієвих тарілок 3, розділювальної тарілки 4 з регулювальним гвинтом 7, кришки 2, кільця ущільнювача 5, гайки 6.

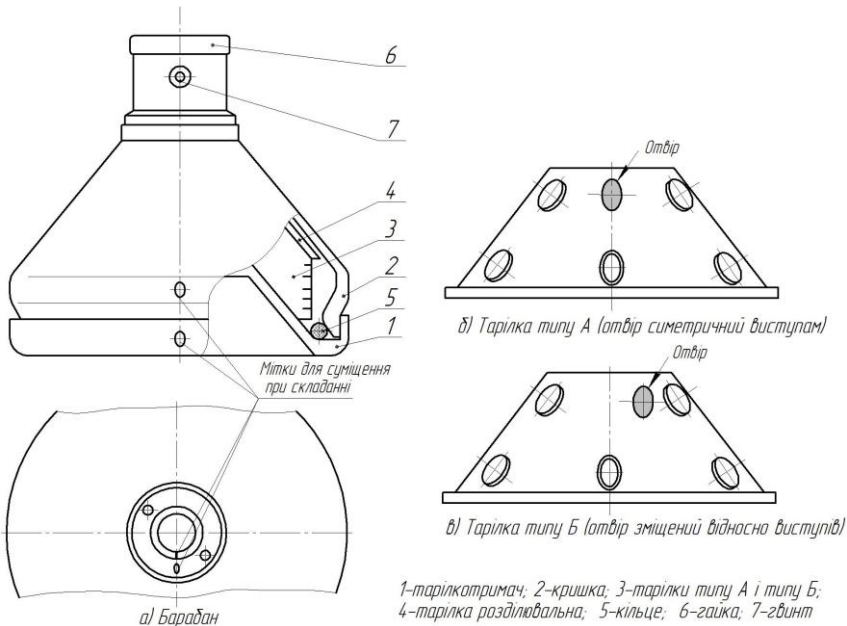


Рисунок 3 – Барабан сепаратора „Мотор-Січ СЦМ 80“

Приймально-вивідний пристрій (посуд) служить для подачі підігрітого молока в барабан і виведення вершків і обрату з барабана. Посуд складається з молокоприймача з пробковим краном, поплавкової камери з поплавцем, приймачів вершків і обрату.



Рисунок 4 – Фото сепаратора „Мотор-Січ СЦМ 80“

1- тарілкотримач з тарілками; 2- кришка барабана; 3- гайка; 4- ключ.

Таблиця 1 – Технічна характеристика сепаратора „Мотор-Січ СЦМ 80“

1 Продуктивність по молоку, л/год.	80
2 Частота обертання барабана, об/хв.	10500±1000
3 Кількість тарілок у барабані, шт.	10...12
4 Місткість молокоприймача, л	12
5 Вміст жиру в молочному обрaті, %	Не більше 0,05
6 Об'ємні співвідношення жиру до молочного обрaту	Від 1:4 до 1:10
7 Потужність споживана, Вт	Не більше 60
8 Напруга живлення, В, частота струму, Гц	220±10%, 50 Гц
9 Температура молока, що сепарується, °С	35...40
10 Габаритні розміри, мм: - діаметр чаші - висота	365 520
11 Маса сепаратора, кг	6

## Центрифуга для визначення жирності молока

Центрифуга (рисунок 5) призначена для центрифугування неоднорідних систем, у тому числі і молока, з метою визначення його жирності та жирності компонентів після сепарації.

Центрифуга складається з корпусу 9, який має три опорні ніжки. На корпусі за допомогою кронштейна 7 закріплений електродвигун 8 *ДМ 126/4-А67216* – трифазний, потужність  $P_e = 300$  Вт, частота обертання  $n = 1360$  об/хв.

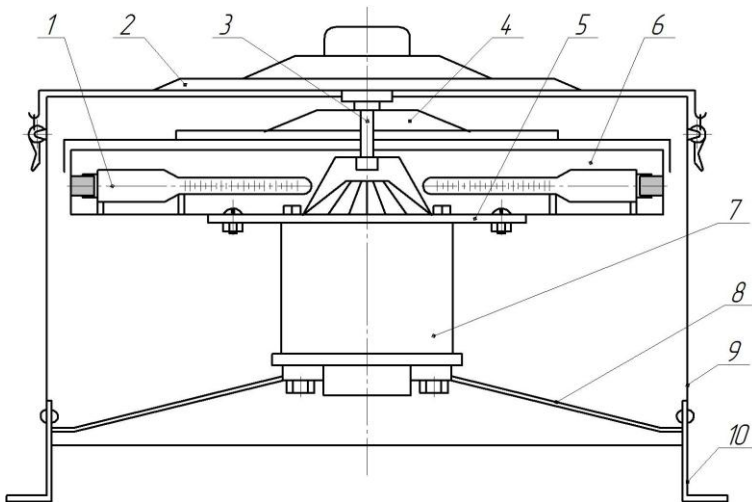


Рисунок 5 – Центрифуга для визначення жирності молока

1 - бутирометр; 2 - кришка корпусу центрифуги; 3 - гвинт кріплення кришки ротора; 4 - кришка ротора; 5 - опорна пластина ротора; 6 - ротор; 7 - електродвигун; 8 - кронштейн кріплення електродвигуна; 9 - корпус центрифуги; 10 - опорні стійки.

На валу електродвигуна за допомогою шести гвинтів закріплений ротор центрифуги 6. На роторі встановлюються бутирометри 1. Зверху ротор закритий кришкою ротора 4. Для забезпечення безпеки роботи центрифуги корпус центрифуги зверху також закритий кришкою 2. Для швидкої зупинки ротора при вимкненому двигуні застосовується гальмо.



## **5 Методика проведення лабораторної роботи**

### **5.1 Розділення молока на сепараторі**

1 Ознайомитись з будовою сепаратора і принципом його дії. Перевірити наявність усіх необхідних частин сепаратора та їх справність.

2 Викреслити схему тарілки сепаратора і проставити всі необхідні розміри.

3 Вкласти в канавку барабана гумове кільце і послідовно встановити тарілки – спочатку тарілки типу „А“, потім типу „Б“ (рисунок 3). Тарілки встановлювати без особливих зусиль, оскільки легким провертанням тарілка сідає на тригранник тарілкотримача у потрібне положення.

4 Накрити зверху пакет тарілок розділовою тарілкою так, щоб її виступ увійшов до паза кришки барабана. Мітку „0“ на кришці барабана сумістити з такою ж міткою нижньої частини тарілкотримача (рисунок 3).

5 Закрутити рукою гайку. Остаточне затягування гайки виконати ключем (поз. 4 рисунок 4), вставивши два його виступи в отвори на торці гайки 3. Затягування гайки проводити до поєднання мітки „0“ на гайці з рисою (зарубкою) на різьбовій частині тарілкотримача (рисунок 3).

6 Установити приймач молочною оброту 13 і приймач вершків 12. Провернути рукою за гайку барабана і переконатися у відсутності його торкання до корпусу і приймачів оброту і вершків. Під носиками приймачів установити ємності, більшу для оброту і меншу для вершків.

7 Установити поплавкову камеру (поз. 3 рисунок 2), вкласти в порожнину поплавець, установити молокоприймач, вставити пластмасову пробку-кран у конусний отвір гумового корпусу на дні молокоприймача. Пробка повинна бути в положенні „Закрито“, тобто загострена частина рукоятки пробки повинна бути повернена убік від виїмки на кромці молокоприймача.

8 Переконатись, що клавiшний вмикач сепаратора 10 стоїть у положенні „0“, тобто, вимкнений, і вставити вилку шнура в розетку. Сепаратора включати тільки за допомогою клавiшного вмикача.

9 Підключити сепаратор до приладу К-505 керуючись представленою електричною схемою (рисунок 6).

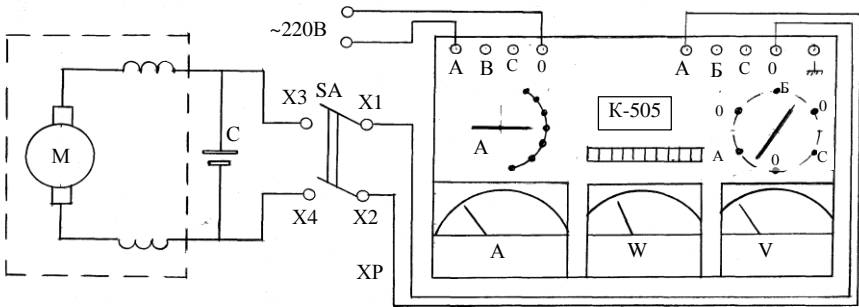


Рисунок 6 – Схема підключення сепаратора і приладу К-505

SA - вимикач; XP - шнур армований; C - конденсатор; M - електродвигун ДС-0,02; X1, X2 - гнізда шнура; X3, X4 - гнізда електродвигуна.

10 Профільтрувати і підігріти молоко до температури 35...40 °С.

11 Увімкнути електродвигун сепаратора і пропустити через апарат до 1 л гарячої води при температурі 45...50 °С. Вимкнути двигун.

12 Відрегулювати сепаратор на потрібну жирність вершків гвентом з квадратним отвором, встановленим у верхній частині розподільної коробки. Регулювання проводити спеціальним ключем.

13 Залити в чашу молокоприймача проціджене цільне молоко і увімкнути електропривод сепаратора. Після досягнення повної швидкості обертання барабана через 30...40 с після включення відкрити кран (повернути ручку пробки загостреною частиною у бік зарубки на кромці молокоприймача).

14 Повторити п.п. 12 і 13 не менше п'яти разів, регулюючи ступінчасто за кожним разом жирність вершків.

15 Закінчити серію дослідів і пропустити через сепаратор до 1 л теплої води. Після зупинки двигуна сепаратор розібрати і усі деталі, які контактували з молоком промити гарячою водою і висушити.

## 5.2 Визначення вмісту жиру в молоці кислотним методом

1 Відміряти в бутирометр (рисунок 7) так, щоб не замочити шийку 3, 10 мл сірчаної кислоти густиною  $1,81...1,82 \text{ г/см}^3$ .

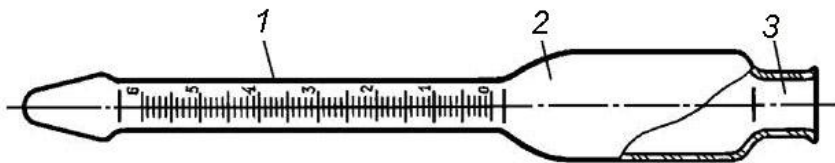


Рисунок 7 – Бутирометр для визначення жирності молока:

1- шкала; 2- резервуар; 3- шийка під пробку.

2 Відміряти піпеткою 10,77 мл добре перемішане молоко (вершки, обрат) і акуратно влити його в бутирометр, по стінці, так щоб не змішувати його з кислотою.

3 Відміряти 1 мл ізоамілового спирту так, щоб не замочити шийку бутирометра.

4 Після заповнення бутирометра закрити його гумовою пробкою і загорнути в серветку.

5 Збовтати вміст бутирометра, поставити його пробкою униз у водяну баню на 5 хвилин при температурі  $65 \text{ }^\circ\text{C}$ .

6 Витерти бутирометр встановити на центрифугу і прокрутити протягом 5 хвилин зі швидкістю не менше 1000 об/хв.

7 Поставити бутирометр на 5 хв. у водяну баню з температурою  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  пробкою униз.

8 Витягнути бутирометр, протерти його і встановити нижню межу стовпчика жиру по нижній межі меніска.

9 Дані експериментальних досліджень занести в таблицю №1.

## 6 Вимоги техніки безпеки

Під час проведення роботи додержуватись положень загальної інструкції з охорони праці, наведеної у розділі „Загальні вимоги безпеки“. Під час проведення дослідів звертати увагу на безпечність заповнення бутирометрів кислотою і ізоаміловим спиртом.

Таблиця 1 – Експериментальні параметри процесу сепарації

№ випроб.	Позиція гвинта	Регулювальний зазор	Вершки		Відвійки		Тривалість. дослду	Потужність	Продуктивність по вершках	Продуктивність по відвійках
			кількість	жирність	кількість	жирність				
			об.	мм	л (кг)	%				
1										
2										
3										
4										
5										

## 7 Обробка результатів експерименту

1) Визначити кількість продуктів розділення (вершків і молочних відвійок), а також співвідношення між об'ємами вершків і обратом.

2) Визначити густину молока, вершків та молочних відвійок.

3) Розрахувати експериментальну продуктивність сепаратора по вершках, обрату і загальну.

$$W_{верш.} = Q_{верш.} / t, \text{ л/с}; \quad W_{обб.} = Q_{обр.} / t, \text{ л/с}; \quad W_{заг.} = Q_{заг.} / t, \text{ л/с.}$$

4) Розрахувати теоретичну продуктивність сепаратора за формулою (7).

$$W_T = 48 \cdot 10^6 \cdot \beta \cdot n^2 \cdot z \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot (R_б^3 - R_m^3)$$

4) Визначити фактор розділення за формулою

$$F_p = 4n^2 \cdot R_{cp}, \quad (8)$$

де  $R_{cp}$  - середній радіус обертання, м ;

$n$  - частота обертання барабана, об/с.

$$R_{cp} = \frac{R_б + R_m}{2}$$

5 Побудувати графік залежності жирності сметани і молочної відвійки від величини регульованого зазору  $\Delta l_{рег}$ .



Рисунок 8 – Приклад оформлення графіка за результатами дослідів

### 8 Контрольні питання для самоконтролю

- 1 З яких елементів складається сепаратор та їх призначення?
- 2 Як поділяють сепаратори за їх технологічним призначенням?
- 3 Що є рушійною силою процесу розділення на відцентровому сепараторі?
- 4 Як визначається продуктивність сепаратора розрахунковим і експериментальним шляхом?
- 5 Чому вершки рухаються до центра барабана, а молочні відвійки (обрат) – до периферії?
- 6 У якій частині барабана збираються механічні домішки?
- 7 Як впливає на технологічні показники кут нахилу твірної тарілки сепаратора?
- 8 Як регулюється співвідношення вершків і молочних відвійок, а також жирність вершків?
- 9 Як впливає на якість розділення відстань між тарілками сепаратора?
- 10 Опишіть методику визначення жирності молочних продуктів.

## 9 Тестові завдання

1) До якого з видів двофазних неоднорідних систем відноситься молоко?

1 суспензії;                      2 емульсії;                      3 піни.

2) Як називають вершки (жир), що знаходяться у молоці?

1 дисперсійна фаза;                      2 дисперсна фаза;  
3 обидві назви рівноцінні.

3) Укажіть, у якому напрямі рухаються жирові кульки в міжтарілковому просторі сепаратора

1 від осі обертання барабана;    2 до осі обертання барабана;  
3 осідають на стінках барабана.

4) За допомогою якого пристрою регулюють сепаратор на потрібну жирність вершків?

1 гайкою барабана;                      2 гвинтом з квадратним отвором;  
3 пробкою-краном у молокоприймачі.

5) Вкажіть, чим відрізняється тарілка типу „А“ від тарілки типу „Б“ сепаратора „Мотор Січ“?

1 кутом нахилу твірної конуса;                      2 матеріалом;  
3 розташуванням отворів відносно виступів.

## Література

1 Кутенев П.В. Практикум по молочному делу. / П.В. Кутенев, Н.В. Барабанщиков - М.: Агропромиздат, 1988. - 224с.

2 Справочник по молочному делу. - М.: Колос, 1968. - 347с.

3 Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум. Під ред. І.Ф. Малежика. - К.: НУХТ, 2006. - 224 с.

4 Сепаратор центробежный молочный „Мотор Сич СЦМ-80“ Паспорт. ОАО „Мотор Сич“, 2001.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### РОЗДІЛЕННЯ НЕОДНОРІДНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ВІДЦЕНТРОВОГО ФІЛЬТРУВАННЯ

**Мета роботи:** визначення рушійної сили фільтрувальної центрифуги періодичної дії, експериментальне підтвердження її показників, розрахунок фактора розділення та витрати енергії на валу фільтрувальної центрифуги.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основні теоретичні положення процесу відцентрового фільтрування;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальної механічної барабанної центрифуги;
- провести аналітичне визначення показників процесу відцентрового фільтрування;
- провести експериментальні дослідження процесу фільтрування зразка рідкого середовища (суспензії);
- обробити результати експерименту;
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:**
  - основні загальні питання процесу фільтрування; конспект лекцій, рекомендовану літературу;
- **знати:**
  - область застосування процесів фільтрування на переробних та харчових підприємствах, класифікацію обладнання;
- **вміти:** виконувати розрахунки процесу фільтрування, проводити налаштування експериментальної центрифуги, користуватися контроль-вимірними приладами, визначати залежності за темою дослідження, аналізувати результати дослідів.

### 3 Основні теоретичні положення

**Фільтруванням** у загальному сенсі називається процес поділу суспензій, пилів і туманів через пористу, так звану фільтрувальну перегородку, здатну пропускати рідину або газ, але затримувати зважені в них частки (фільтрація на відміну від фільтрування – це рух рідини або газу крізь пористе середовище, наприклад, просочування води крізь ґрунт основи греблі). Фільтрування здійснюється під дією різниці тисків перед фільтруючою перегородкою і після неї, або у *полі відцентрових сил*.

*Відцентрове фільтрування* – це процес розділення суспензій у полі відцентрових сил з використанням проникних для рідини перегородок. Кінцева мета цього процесу – отримання осаду з мінімальним вмістом рідкої фази або фільтрату з мінімальним вмістом твердої фази. До цього виду фільтрування відносять центрифугування.

Рушійною силою при відцентровому фільтруванні буде перепад тисків, який визначають за рівнянням:

$$\Delta p = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} (R^2 - r_1^2), \quad (1)$$

де:  $\rho$  - густина суспензії, кг/м<sup>3</sup>;

$\omega$  - кутова швидкість, рад/с;

$R$  - внутрішній радіус перфорованого барабана, м;

$r_1$  - внутрішній радіус шару суспензії, м.

Рушійна сила при відцентровому фільтруванні є більшою порівняно з такою ж при фільтруванні під дією гідростатичного тиску стовпа суспензії у  $K_p$  разів. Величина  $K_p$  – це фактор розділення (він ще має назву критерію *Фруда*), що є відношенням відцентрового прискорення до прискорення вільного падіння:

$$K_p = \frac{\omega^2 \cdot r}{g} = \frac{(2\pi \cdot n)^2 \cdot r}{g} = 4\pi^2 \cdot r, \quad (2)$$

де:  $r$  - середній радіус шару суспензії, м;

$n$  - частота обертання барабана центрифуги, с<sup>-1</sup>;

$g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;



Розділова спроможність центрифуг характеризується індексом продуктивності, який являє собою площу поверхні фільтрування або фільтра для даної суспензії, при якій досягається та сама продуктивність, що й продуктивність, яку він характеризує

$$I = F_{rcp} \cdot S_{cp}, \quad (3)$$

де  $F_{rcp}$  - середній фактор розділення центрифуги;

$S_{cp}$  - середня площа поверхні розділення, м<sup>2</sup>.

$$F_{rcp} = \frac{\omega^2 (R + r_1)}{2g},$$

$$S_{cp} = \pi \cdot H \cdot (R + r_1)$$

де:  $H$  - висота барабана центрифуги, м;

Таким чином

$$I = \frac{\pi \cdot H \cdot \omega^2 (R + r_1)}{2g}. \quad (4)$$

Витрату енергії для періодично діючої центрифуги розраховують окремо для пускового і робочого періодів. Максимальна витрата енергії потрібна в пусковий період, коли додається інерція маси обертових частин центрифуги та завантаженого матеріалу. У робочий період витрата енергії зменшується.

Повна витрата енергії у центрифугі періодичної дії складається:

1) Витрата енергії на подолання інерції маси барабана, кВт.

$$P_{\delta} = \frac{A_{\delta}}{1000 \cdot \tau} = \frac{m_{\delta} \cdot v^2}{2 \cdot 1000 \cdot \tau} = \frac{m_{\delta} \cdot \omega^2 \cdot R^2}{2 \cdot 1000 \cdot \tau}, \quad (5)$$

де  $A_{\delta}$  - робота, витрачена на подолання інерції маси барабана, Дж;

$\tau$  - тривалість розгону центрифуги, с;

$m_{\delta}$  - маса барабана, кг;

$v$  - колова швидкість обертання барабана, м/с;

$\omega$  - кутова швидкість обертання барабана, рад/с;

$R$  - внутрішній радіус барабана, м.

2) Витрати енергії на подолання інерції маси матеріалу (суспензії), кВт:

$$P_c = \frac{A_c}{1000 \cdot \tau \cdot \eta} = \frac{m_c \cdot v^2}{2 \cdot 1000 \cdot \tau \cdot \eta} = \frac{m_c \cdot \omega^2 \cdot (R + r_1)^2}{8 \cdot 1000 \cdot \tau \cdot \eta}, \quad (6)$$

де:  $A_c$  - робота на подолання інерції маси матеріалу (суспензії), Дж,

$m_c$  - маса завантаженої суспензії, кг;

$\eta$  - коефіцієнт, що враховує додаткову витрату енергії на перемішування суспензії у барабані ( $\eta = 0,8 \dots 0,95$ ).

3) Витрати енергії на подолання тертя вала в підшипниках, кВт.

$$P_m = \frac{g(m_{\bar{o}} + m_c) \cdot f \cdot v_g}{1000}, \quad (7)$$

де:  $f$  - коефіцієнт тертя у підшипниках;

$v_g$  - колова швидкість на поверхні вала центрифуги, м/с.

При розрахунках приймається для кулькових підшипників значення  $f = 0,2 \dots 0,03$ ; для підшипників ковзання  $f = 0,5 \dots 0,6$ .

Колова швидкість на поверхні вала центрифуги знаходиться як:

$$v_g = \pi \cdot d_g \cdot n,$$

де  $d_g$  - діаметр шийки вала, м;

4) Витрати енергії на подолання тертя барабана об повітря, кВт.

$$P_{нов} = 2,85 \cdot 10^{-4} \cdot H \cdot D^4 \cdot n^3, \quad (8)$$

де:  $D$  - зовнішній діаметр барабана, м.

Максимальна розрахункова витрата енергії (потужність на валу центрифуги) під час пуску, кВт:

$$P_n = P_{\bar{o}} + P_c + P_m + P_{нов}. \quad (9)$$

За значенням цієї потужності вибирають двигун. Для скорочення тривалості розгону потужність двигуна збільшують: для центрифуг з ручним або механізованим розвантаженням на 10...20%, а для саморозвантажувальних – 50%.

У робочий період витрата енергії значно менше, кВт:

$$P_p = 0,25 P_c + P_{нов} + 0,66 P_m. \quad (10)$$

#### 4 Оснащення лабораторної роботи приладами і пристроями

- 1) Установка для експериментального визначення параметрів процесу відцентрового фільтрування.
- 2) Електронні терези;
- 3) Вимірювальний циліндр;
- 4) Тахометр;
- 5) Амперметр, вольтметр (або ватметр);
- 6) Секундомір.

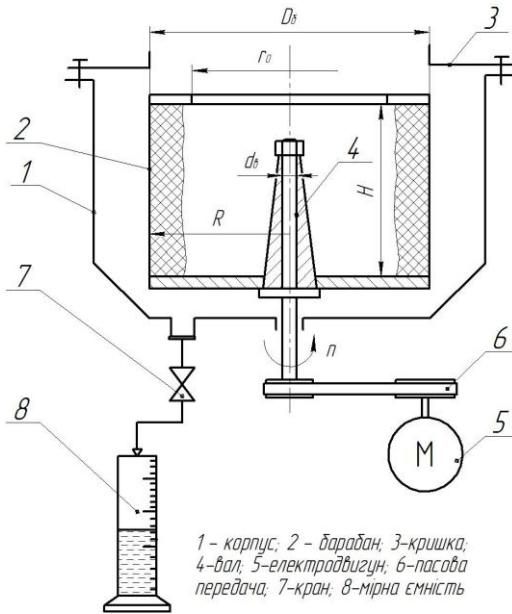


Рисунок 1 – Схема центрифуги

У дні кожуха є патрубок з краном 7 для відведення фільтрату в мірний циліндр 8.

Частота обертання барабана центрифуги регулюється за допомогою лабораторного автотрансформатора.

У даній роботі фільтрування суспензій моделюється процесом видалення води зі змоченої поролонової стрічки.

В основі лабораторної установки (рисунок 1) є фільтрувальна центрифуга періодичної дії, що складається з перфорованого барабана 2, закріпленого на вертикальному валу 4, який, у свою чергу, через клинопасову передачу 6 з'єднаний з електродвигуном постійного струму 5.

Центрифуга має тахометр для вимірювання частоти обертання барабана. Кожух 1 центрифуги закритий кришкою 3.



Рисунок 2 – Фото лабораторної установки та її барабана

### 3 Методика проведення лабораторної роботи

1 Визначити розміри барабана центрифуги і його масу.

$R$  - внутрішній радіус барабана, м;

$r_1$  - внутрішній радіус кільцевого шару суспензії у барабані, м;

$r_c$  - середній радіус шару суспензії, м, ;

$\delta$  - товщина поролонової стрічки, м;

$d_6$  - діаметр шийки вала, м;

$H$  - висота барабана, м;

$D$  - зовнішній діаметр барабана, м;

$m_6$  - маса барабана, кг;

Отримані заміри занести у таблицю 1

Таблиця 1 – Основні геометричні параметри центрифуги.

Параметри барабана	$R$ , м	$r_I$ , м	$r_c$ , м	$\delta$ , м	$d_a$ , м	$H$ , м	$D$ , м	$m_\phi$ , кг	$n$ , об/с
Значення									

2 Закрити кришку кожуха центрифуги.

3 Увімкнути електродвигун центрифуги, повернувши ручку автотрансформатора:

а) за допомогою секундоміра визначити тривалість розгону центрифуги -  $\tau_x$ , с;

б) за допомогою тахометра визначити частоту обертання барабана -  $n$ , об/с;

4 Вимкнути електродвигун і після повної зупинки центрифуги відкрити кришку кожуха.

5 Змочити у воді, або в іншій рідині поролонову стрічку і рівномірно розмістити її всередині барабана центрифуги.

6 Закрити кришку кожуха і увімкнути електродвигун, повернувши ручку трансформатора в положення, що відповідає заданій частоті обертання барабана центрифуги.

7 Визначаємо тривалість розгону -  $\tau_p$ , с, масу зібраного фільтрату -  $m_\phi$ , кг, та витрати енергії -  $I$ , А, -  $U$ , В.

8 Після закінчення фільтрування вимкнути електродвигун.

9 При повній зупинці барабана центрифуги відкрити кришку кожуха і вийняти поролонову стрічку.

10 Визначити масу поролонової стрічки -  $m_n$  і масу завантаженої суспензії -  $m_c$ , кг;  $m_c = m_\phi + m_n$

Отримані експериментальні дані занести у таблицю 2.

Таблиця 2 – Експериментальні дані роботи.

Параметри експерименту	$\tau_x$ , с	$\tau_p$ , с	$n$ , об/с	$m_\phi$ , кг	$m_n$ , кг	$m_c$ , кг	$I$ , А	$U$ , В
Значення								

#### 4 Обробка результатів роботи

1 Визначити кутову швидкість барабана, рад/с

$$\omega = 2\pi \cdot n .$$

2 Визначити рушійну силу  $\Delta p$  при відцентровому фільтруванні за формулою (1);  $\rho = 1000 \dots 1200$  кг/м<sup>3</sup>.

3 Визначити фактор розділення  $K_p$  (критерій Фруда) за рівнянням (2).

4 Визначити індекс продуктивності  $I$  за формулою (4).

5 Визначити витрату енергії на подолання інерції маси барабана  $P_{\phi}$ , кВт за формулою (5).

6 Визначити витрати енергії на подолання інерції маси матеріалу (суспензії)  $P_c$  за формулою (6).

7 Визначити колову швидкість на поверхні вала центрифуги,  $v_g$ , м/с

$$v_g = \pi \cdot d_g \cdot n .$$

8 Визначити витрати енергії на подолання тертя вала в підшипниках  $P_m$ , кВт, за формулою (7).

9 Визначити витрати енергії на подолання тертя барабана об повітря  $P_{нов}$ , кВт, за формулою (8).

10 Визначити максимальну розрахункову витрату енергії під час пуску  $P_n$ , кВт, за формулою (9).

11 Визначити розрахункову витрату енергії у робочий період  $P_p$ , кВт, за формулою (10).

12. Визначити дійсні витрати енергії на експериментальній установці  $P_g$ . кВт:

$$P_g = I \cdot U / \eta_m ,$$

де  $\eta_m$  - ККД пружної муфти,  $\eta_m = 0,98$ .

13 Отримані розрахункові параметри занести в таблицю 3.

Таблиця 3 – Розрахункові параметри витрати енергії

Розрахункові параметри	$\omega$ , рад/с	$v_e$ , м/с	$\Delta p$ , Па	$K_p$	$I$	$P_b$ , кВт
Значення						
Розрахункові параметри	$P_c$ , кВт	$P_m$ , кВт	$P_{нов}$ , кВт	$P_n$ , кВт	$P_p$ , кВт	$P_g$ , кВт
Значення						

14 Визначити розходження теоретичного  $P_p$  та дійсного  $P_g$  експериментального розрахунку витрат енергії (прийняти  $P_g$  за 100%).

$$\Delta P = \frac{P_g - P_p}{P_g} \cdot 100$$

15 Сформулювати висновки за результатами досліджень.

### 5 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

### 5 Контрольні запитання

1 З яких основних елементів складається дослідна установка та яке її призначення?

2 Як працює фільтрувальна центрифуга і в чому її відмінність від відстійної центрифуги?

3 З яких витрат складається витрата енергії на центрифугу періодичної дії і як їх визначають?

4 Для чого і як визначають тривалість розгону центрифуги?

5 Чому при виборі двигуна для центрифуги збільшують його потужність порівняно з розрахунковою у період пуску?

6 Як визначають рушійну силу процесу? Як вона впливає на процес відцентрового фільтрування і відстоювання?

7 Що характеризує фактор розділення? Як його визначають? Які шляхи його збільшення?

8 Які особливості визначення швидкості фільтрування під дією відцентрової сили?

9 Що служить основою для порівняння центрифуг?

10 Як впливає частота обертання барабана центрифуги на швидкість і якість розділення на фільтрувальній і відстійній центрифугах?

## 7 Тестові завдання

1) Укажіть, за якою формулою визначають рушійну силу відцентрового фільтрування

$$\text{а) } I = \frac{\pi \cdot H \cdot \omega^2 (R + r_1)}{2g}; \quad \text{б) } F_{\text{рсп}} = \frac{\omega^2 (R + r_1)}{2g};$$
$$\text{в) } K_p = \frac{(2\pi \cdot n)^2 \cdot r}{g}.$$

2) Укажіть, яке значення потужності, потрібної на привод центрифуги, є максимальним

а) холостого ходу;      б) при пуску;      в) робочого ходу.

3) Які суміші звичайно піддають відцентровому фільтруванню?

а) розчини;      б) емульсії;      в) суспензії

4) Який вид втрат потужності при центрифугуванні враховує формула  $P = 2,85 \cdot 10^{-4} \cdot H \cdot D^4 \cdot n^3$ ?

а) Витрати енергії на подолання тертя вала в підшипниках;

б) Витрати енергії на подолання тертя барабана об повітря;

в) Витрата енергії на подолання інерції маси барабана.

5) За якою формулою визначається розділова спроможність центрифуги?

$$\text{а) } I = \frac{\pi \cdot H \cdot \omega^2 (R + r_1)}{2g}; \quad \text{б) } I = \frac{\pi \cdot H \cdot \omega^2 (R + r_1)}{2g};$$
$$\text{в) } P_{\delta} = \frac{m_{\delta} \cdot \omega^2 \cdot R^2}{2 \cdot 1000 \cdot \tau}.$$

## ЛІТЕРАТУРА

1. Малежик І.Ф. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум. / І.Ф. Малежик, П.С. Циганов. – Київ, НУХТ, 2006. - 224 с. (с. 74-76).

2. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - М. Колос, 1999, - 551с. (с.124-157).

3. Горбатюк В.И. Процессы и аппараты пищевых производств. / В.И. Горбатюк. - М. Колос, 1999, - 335с. (с.105- 118).

4. Шалугін В.С. Процеси та апарати промислових технологій. / В.С. Шалугін, В.М. Шмандрій. - Київ «Центр учбової літератури», 2008. - 392с. (с. 72-77).



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ У РІДКОМУ СЕРЕДОВИЩІ НА МЕХАНІЧНІЙ ЛОПАТЕВІЙ МІШАЛЦІ

**Мета роботи:** визначення експериментальним шляхом параметрів критеріального рівняння процесу перемішування для застосування його в розрахунку витрат енергії при перемішуванні будь-якої рідини мішалкою, геометрично подібною мішалці досліджуваного типу; визначення якості перемішування.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основні теоретичні положення процесу перемішування;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальної механічної лопатевої мішалки;
- сформулювати початкові дані для проведення експерименту;
- провести експериментальні дослідження процесу перемішування рідкого середовища;
- обробити результати експерименту;
- побудувати графіки основних залежностей, що характеризують ефективність процесу перемішування;
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

**- повторити:**

1) основні загальні питання процесу перемішування;

**- знати:**

1) область застосування процесів перемішування на переробних та харчових підприємствах, класифікацію обладнання;

**- вміти:** проводити налаштування експериментальної мішалки, користуватися контрольно-вимірними приладами, визначати залежності за темою дослідження, аналізувати результати досліджень.

### 3 Основні теоретичні положення

Мета технологічних процесів перемішування, що застосовуються у різних харчових та переробних виробництвах. це отримання однорідної суміші з різних компонентів у різних її видах (емульсії, суспензії, суміші твердих компонентів), а також інтенсифікація теплових, масообмінних і біохімічних процесів.

Процес перемішування з гідродинамічної точки зору може бути розглянутий як процес зовнішнього обтікання тіл потоком рідини. При обертанні робочого органу мішалки енергія затрачується на подолання тертя лопатей об рідину і на утворення у ній вихорів.

Представивши циркуляцію рідини в змішувачі як рух по замкнутому трубопроводу складної форми, можна використати критеріальне рівняння, що зв'язує фізичні характеристики руху рідини:

$$Eu = f(Re, Fr, \Gamma_1, \Gamma_2), \quad (1)$$

де  $Eu$  - критерій Ейлера, міра відношення сили тиску і сили інерції у потоці;  $Re$  - критерій Рейнольдса, міра відношення сил інерції і сил тертя у потоці рідини;  $Fr$  - критерій Фруда, міра відношення сил інерції і сил тяжіння;  $\Gamma_1, \Gamma_2$  - параметричні критерії, що характеризують геометричні розміри мішалки і змішувача.

Зазначені величини визначаються за виразами:

- критерій Ейлера 
$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot V^2}, \quad (2)$$

де  $\Delta p$  - різниця тиску з одного і з іншого боку лопаті мішалки, кг/м<sup>2</sup>;  
 $\rho$  - густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  - лінійна швидкість руху, м/с;

- критерій Рейнольдса 
$$Re = \frac{V \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (3)$$

де  $d$  - діаметр лопаті мішалки, м;

$\mu$  - динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с;

- критерій Фруда 
$$Fr = \frac{V^2}{g \cdot l}, \quad (4)$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$l$  - лінійний розмір мішалки, м;

Робочий орган мішалки звичайно занурений у рідину на достатню глибину, тому гідравлічний опір, в основному, обумовлений силою тертя, а вплив сили тяжіння на рух рідини невеликий і ним можна нехтувати, виключивши критерій Фруда.

Дійсну лінійну швидкість перемішування рідини визначити складно, і замість неї використовуємо еквівалентну величину – частоту обертання робочого органу мішалки.

$$V = \pi \cdot d \cdot n, \quad (5)$$

де  $n$  - частота обертання мішалки, с<sup>-1</sup>;

$d$  - діаметр мішалки, м.

Діаметр мішалки використовуватимемо як лінійний розмір.

Тоді 
$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \cdot v^2} = \frac{\Delta p}{\rho(n \cdot d)^2} \quad (6)$$

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{n \cdot d \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu}; \quad (7)$$

При підстановці число  $\pi$  не використане, як таке, що не впливає на фізичне значення критерію.

Різниця тиску  $\Delta p$ , що входить у модифікований критерій, є різницею тиску з одного і з іншого боку лопаті мішалки. Сила  $F$ , що переміщує лопать, пропорційна цій різниці та площі лопаті  $S$ .

$$\Delta p = F/S, \quad (8)$$

Потужність на валу мішалки  $P$  пропорційна силі  $F$  та колівій швидкості:

$$P \approx F \cdot n \cdot d, \quad (9)$$

або 
$$F \approx P / (n \cdot d). \quad (10)$$

Замінивши  $F$  у виразі (8), маючи на увазі, що  $S$  пропорційна  $d^2$ , отримаємо:

$$\Delta p = \frac{P}{n \cdot d \cdot s} = \frac{P}{n \cdot d^3} \quad (11)$$

Підставивши отримане значення  $\Delta p$  у вираз (6)

$$Eu = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}, \quad (12)$$

Тоді згідно рівнянню (1) можна записати:

$$\frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5} = f \cdot \left( \frac{n \cdot d^2 \rho}{\mu} \right); \quad (13)$$

Це рівняння можна представити у вигляді степеневої функції

$$Eu = A \cdot Re^m, \quad (14)$$

де  $A$  і  $m$  – постійні, що визначають дослідним шляхом.

Це критеріальне рівняння зі знайденими значеннями  $A$  і  $m$  використовується для визначення витрат енергії при перемішуванні будь-якої рідини мішалкою, геометрично подібній мішалці дослідного типу.

Розрахункова критеріальна залежність для процесу перемішування визначається двома рівняннями:

$$Eu = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}; \quad (15)$$

$$Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu}; \quad (16)$$

#### 4 Початкові дані для проведення експерименту

- а) Геометричні розміри лопаті мішалки: діаметр лопаті мішалки, висота лопаті;
- б) Геометричні розміри посудини: діаметр посудини, висота, об'єм рідини, що заливається;
- в) Параметри рідин, які випробовуються: густина, в'язкість, температура.

#### 5 Оснащення лабораторної роботи механізмами і приладами

Механічна лопатева мішалка,  
Змінні робочі органи (лопаті) мішалки.  
Посудина для перемішування рідких компонентів.  
Вольтметр постійного струму 0...30 В.  
Амперметр постійного струму 0...3 А.  
Прилад для визначення густини рідини.  
Прилад для визначення в'язкості рідини.  
Термометр 0...100 °С.  
Мірильний інструмент.

Дослідження процесу перемішування проводиться на лабораторній механічній лопатевій мішалці для рідкого середовища (рисунок1).

Установка складається з рами 1, до якої приварена стійка 6. На кронштейні стійки закріплюється електродвигун 5 постійного струму. Тип двигуна ПИИ 12.11.МОН.82; потужністю  $P_e = 4,7$  кВт при  $n = 1000$  об/хв.; максимальна напруга  $U = 60$  В. Двигун одержує живлення від автотрансформатора 8 з випрямлячем струму по кабелю 9.

Змінення обертів двигуна виконується за допомогою ручки регулятора напруги 7. Параметри електроживлення фіксуються вольтметром постійного струму 12 з межею вимірювання  $U = 0...30$  В і амперметром постійного струму 13  $A=0...5$  А. Живлення приладів здійснюється за допомогою провідників 11, які за допомогою вилок і двох розеток 10 підключені до автотрансформатора 8.

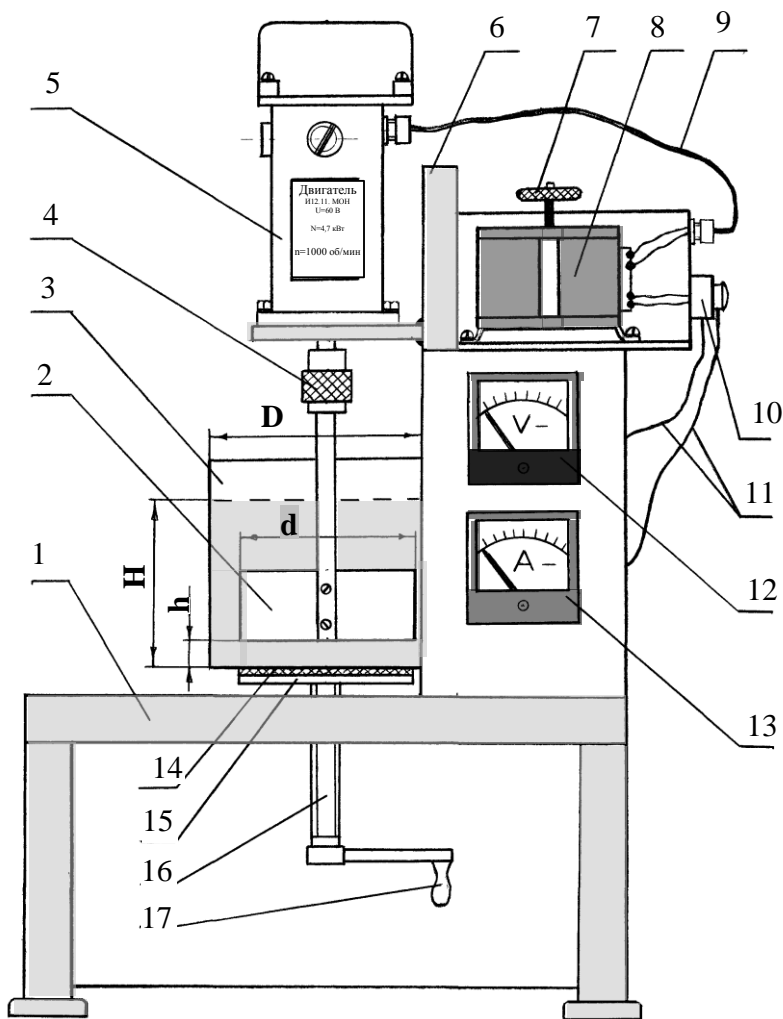


Рисунок 1 – Схема експериментальної механічної мішалки

1 - рама; 2 - робочий орган; 3 - посудина з рідиною; 4 - цанговий затискач; 5 - електродвигун постійного струму; 6 - стійка; 7 - ручка регулятора напруги; 8 - автотрансформатор; 9 - кабель живлення електродвигуна; 10 - розетки увімкнення вольтметра і амперметра; 11 - дроти живлення приладів; 12 - вольтметр; 13 - амперметр; 14 - гумова прокладка; 15 - платформа підйомника; 16 - гвинт; 17 - ручка підйомного механізму.

До електродвигуна за допомогою цангового затискача 4 приєднується робочий орган 2 (вал з лопатями). Рідина для випробування знаходиться у посудині 3, яка встановлена на платформі 15, має гвинтовий підйомник 16. Лабораторна установка вмикається в однофазну мережу з напругою 220 В.



Рисунок 2 – Фото експериментальної лабораторної установки

## 6 Методика проведення лабораторної роботи

### Перший етап експериментальних досліджень

1) Заміряти і записати в таблицю 1 усі розміри мішалки і посудини.

2) Провести тарування частоти обертання двигуна за значення ми напруги, для чого зняти верхню кришку електродвигуна і встановити механічний тахометр ТЧ-10Р на вал двигуна.

За допомогою автотрансформатора послідовно встановлювати на вольтметрі напругу 5, 10, 15, 20, 25 В і відповідно фіксувати частоту обертання електродвигуна.

3) Установити, за допомогою цангового затискача, на вал мішалки необхідний робочий орган і за допомогою рукоятки занурити його в посудину з рідиною так, щоб рівень рідини під робочим органом і над ним був приблизно однаковим.

4) Увімкнути електродвигун і за планом досліджень встановити перше значення частоти обертання робочого органу (лопатевої мішалки). Зафіксувати напругу і силу струму для визначення повної потужності, яка витрачається на перемішування.

5) Провести п'ять дослідів за пунктом 4), ступінчасто змінюючи частоту обертання двигуна, керуючись показаннями вольтметра і тарувального графіка.

6) Від'єднати робочий орган від вала двигуна і прибрати посудину з рідиною. Увімкнути електродвигун і на холостих обертах визначити напругу  $U_{xx}$  і силу струму  $I_{xx}$ . Досліди провести при трьох значеннях частоти обертів ротора.

7) Заміряти температуру, густину і в'язкість рідини, яка досліджувалась.

8) Провести математичну обробку результатів дослідів на основі усіх експериментальних даних, занесених у таблицю 1.

9) Злити рідину з посудини і ретельно очистити поверхні експериментальної установки та прибрати робоче місце.



Таблиця 1 – Експериментальні і розрахункові параметри процесу перемішування рідини

Назва параметра	Познач.	Розмірн.	Номер експерименту				
			1	2	3	4	5
Діаметр лопаті мішалки	$d$	м					
Діаметр посудини	$D$	м					
Висота шару рідини	$H$	м					
Зазор між лопаттю і дном	$h$	м					
Температура рідини	$t$	°С					
Густина рідини	$\rho$	Кг/м <sup>3</sup>					
В'язкість рідини	$\mu$	Па·С					
Частота обертання мішалки	$n$	С <sup>-1</sup>					
Напруга під навантаженням	$U$	В					
Сила струму навантаження	$I$	А					
Потужність навантаження	$P$	Вт					
Напруга холостого ходу	$U$	в					
Сила струму холостого ходу	$I$	А					
Потужність холостого ходу	$P_{xx}$	Вт					
Потужність перемішування	$P_m$	Вт					
Критерій Ейлера для перемішування	$Eu$						
Логарифм критерію Ейлера	$lgEu$						
Критерій Рейнольдса для перемішування	$Re$						
Логарифм критерію Рейнольдса	$lgRe$						
Постійна степеневі функції	$m$						
Показник степеня	$A$						

## 7 Обробка результатів експерименту

Тарувальну характеристику залежності числа обертів вала двигуна від напруги  $n = f(U)$  оформити за прикладом на рисунку 3.



Рисунок 3 – Приклад оформлення тарувального графіка

Значення повної потужності, яка витрачається на привод мішалки під час проведення експерименту і потужності холостого ходу електродвигуна визначаються за формулами.

$$P = I \cdot U ; \quad P_{xx} = I_{xx} \cdot U_{xx} . \quad (17, 18)$$

Потужність на валу мішалки, яка витрачається безпосередньо на процес перемішування, визначається як:

$$P_m = (P - P_{xx}) \cdot \eta_{дв} \cdot \eta_{пер} , \quad (19)$$

де  $P$  - потужність, визначена за формулою (17), Вт;

$P_{xx}$  - потужність холостого ходу електродвигуна, Вт;

$\eta_{дв}$  - ККД електродвигуна  $\eta_{дв} = 0,8...0,85$ ;

$\eta_{пер}$  - ККД передачі  $\eta_{пер} = 0,85...0,9$ .

Значення критеріїв Ейлера і Рейнольдса визначаються за формулами (15) і (16) для усіх дослідів і результати заносяться у таблицю 1.

Розраховується логарифм критерію Рейнольдса для кожного досліді, дані заносяться у таблицю 1.

На підставі обчислених значень  $Re$  і  $Eu$  побудувати графік (рис. 2) залежності  $lg Eu = f(lg Re)$

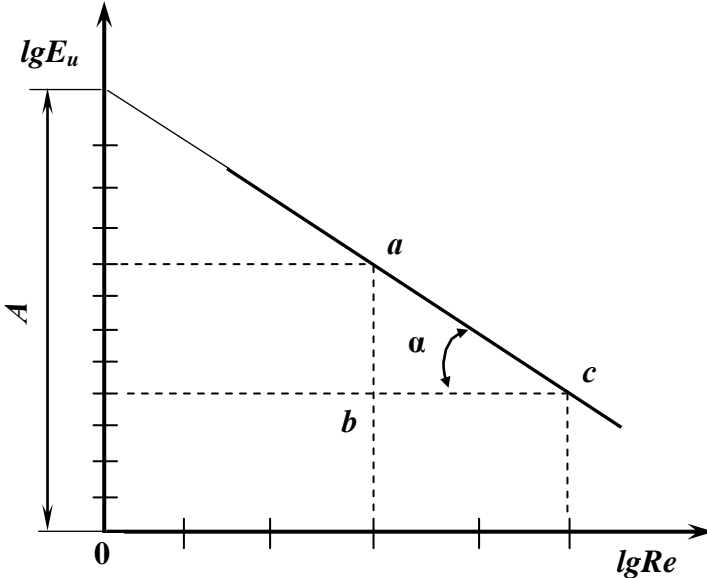


Рисунок 4 – Приклад оформлення графіка залежності  $lg Eu = f(lg Re)$

Показник степеня  $m$  (рівняння (4)) визначається як тангенс кута нахилу отриманої прямої:

$$m = \operatorname{tg} \alpha = \frac{ab}{bc} \cdot \frac{M_y}{M_x},$$

де  $M_y$  і  $M_x$  - масштаби по осі „y“ та по осі „x“.

Оскільки кут  $\alpha$  розташований у другій чверті тригонометричного кола, то величина тангенса буде мати знак мінус.

Постійна  $A$  знаходиться як відрізок прямої, що відсікається, на осі ординат, або з рівняння (14), яке потрібно логарифмувати.

$$Eu = A \cdot Re^m;$$

$$lg Eu = lg A + m \cdot lg Re; \quad lg A = lg Eu + m lg Re$$

Необхідно зробити не менш ніж три визначення і отримати з них середнє значення.

Критеріальне рівняння (14) з певними постійними  $A$  і  $m$  можна використовувати для визначення витрати енергії на перемішування будь-якої рідини мішалкою, геометрично подібною мішалці дослідженого типу.

### Другий етап експериментальних досліджень

Для перевірки отриманого на першому етапі досліджень критеріального рівняння процесу перемішування у рідкому середовищі проводяться дослідження перемішування на геометрично подібній лопатевій мішалці рідини, що має інші фізичні властивості.

Експериментальні дослідження проводяться у тій же послідовності, що й на першому етапі, дані випробувань заносимо в таблицю 2.

Обробка результатів дослідження аналогічна обробці, проведеній на першому етапі.

Розрахункова потужність визначається виходячи з критеріального рівняння  $Eu_m = A \cdot Re_m^m$ ,

$$\text{де: } Eu_m = \frac{P_1}{\rho_1 \cdot n_1^3 \cdot d_1^5} - \text{критерій Ейлера;}$$

$$Re_m = \frac{\rho_1 \cdot n_1 \cdot d_1^2}{\mu_1} - \text{критерій Рейнольдса.}$$

Звідки знаходиться величина  $P_p$ , поставивши її замість  $P_1$

$$P_p = \rho_1 \cdot n_1^3 \cdot d_1^5 A \cdot Re_m^m.$$

Розбіжність теоретичної потужності, витраченої на перемішування, і експериментальної визначається за виразом:

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_p}{P_1} \cdot 100\%$$

Розрахункові дані заносяться у таблицю 2.

Таблиця 2 – Експериментальні і розрахункові параметри процесу перемішування (2 етап).

Назва параметра	Познач.	Розм.	Номер експерименту				
			1	2	3	4	5
Діаметр мішалки	$d_1$	м					
Діаметр судини	$D_1$	м					
Висота шару рідини	$H_1$	м					
Зазор між лопаттю і дном	$h_1$	м					
Температура рідини	$t_1$	°C					
Густина рідини	$\rho_1$	Кг/м <sup>3</sup>					
В'язкість рідини	$\mu_1$	Па · С					
Частота обертання	$n_1$	С <sup>-1</sup>					
Показання вольтметра	$U_1$	В					
Показання амперметра	$I_1$	А					
Потужність перемішування	$P_1$	Вт					
Розрахункова потужність перемішування	$P_p$	Вт					

## 8 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених в розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## 9 Контрольні питання

- 1 Дайте визначення процесу змішування або перемішування.
- 2 За якими характеристиками оцінюється процес перемішування?
- 3 Наведіть класифікацію способів і обладнання для перемішування.
- 4 Поясніть принцип дії та будову лопатевих мішалок.
- 5 Як впливають форма і розміри лопатей мішалки на потужність, потрібну для привода робочого органа?
- 6 Наведіть приклади впливу конструкції мішалки на характер руху рідини при механічному перемішуванні?
- 7 Як визначають витрати енергії при механічному перемішуванні?

## 9 Тестові завдання

1) Укажіть, яке формулювання не можна віднести до мети процесу перемішування?

- 1 Забезпечення рівномірного розподілу твердих часток у рідині.
- 2 Інтенсифікація теплових та масообмінних процесів.
- 3 Виділення з гомогенної суміші одного або групи компонентів.

2) Якими способами реалізується процес перемішування у рідкому середовищі (дати повну відповідь)?

- 1 механічним, потоковим, пневматичним;
- 2 механічним, термічним, пневматичним;
- 3 механічним, потоковим, гравітаційним.

3) За яким головним показником оцінюється якість процесу перемішування?

- 1 за ступенем (рівномірністю) змішування фаз;
- 2 за швидкістю досягнення рівномірного змішування фаз;
- 3 за витратами потужності, потрібної на рівномірне змішування фаз.

4) Яка з названих механічних мішалок розрахована на роботу з підвищеною частотою обертання?

- 1 пропелерна;
- 2 якірна;
- 3 турбінна.

5) Яка з названих механічних мішалок забезпечує найбільш інтенсивне перемішування рідини в осьовому напрямі?

- 1 якірна;
- 2 турбінна;
- 3 пропелерна.

6) Яким критеріальним рівнянням описується вимушений рух рідини при механічному перемішуванні?

- 1  $Eu = f(Re)$ ;
- 2  $Eu = f(Fr)$ ;
- 3  $Re = f(Fr)$ .

7) Від яких параметрів залежить величина критерію Ейлера?

- 1 різниці тиску на різних боках лопаті мішалки, густини рідини, лінійної швидкості руху мішалки;
- 2 діаметра лопаті мішалки, густини рідини, динамічного коефіцієнта в'язкості рідини;
- 3 лінійної швидкості руху мішалки, лінійного розміру мішалки, прискорення вільного падіння.

### **8) Від яких параметрів залежить величина критерію Рейнольдса?**

1 різниці тиску на різних боках лопаті мішалки, густини рідини, лінійної швидкості руху мішалки;

2 діаметра лопаті мішалки, густини рідини, динамічного коефіцієнта в'язкості рідини;

3 лінійної швидкості руху мішалки, лінійного розміру мішалки, прискорення вільного падіння.

### **9) Від яких параметрів залежить величина критерію Фруда?**

1 різниці тиску на різних боках лопаті мішалки, густини рідини, лінійної швидкості руху мішалки;

2 діаметра лопаті мішалки, густини рідини, динамічного коефіцієнта в'язкості рідини;

3 лінійної швидкості руху мішалки, лінійного розміру мішалки, прискорення вільного падіння.

### **10) Від яких параметрів залежить потужність на валу механічної мішалки?**

1 зусилля опору перемішуванню і колової швидкості лопаті;

2 зусилля опору перемішуванню і в'язкості рідини;

3 зусилля опору перемішуванню і висоти шару рідини.

### **Література**

1. Горбатюк. В.И. Процессы и аппараты пищевых производств./ В.И. Горбатюк. - М.: Колос 1999. - 335с.

2. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - М.: Колос, 2000. - 551с.

3. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.Д. Попов. - М.: Пищевая промышленность, 1978. - 660 с.

4. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум. За редакцією проф. І.Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2006. - 224 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ ЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета роботи:** вивчити процес переходу стаціонарного (нерухливого) шару зернистого матеріалу в псевдозріджений (рухливий); визначити основні гідродинамічні характеристики псевдозрідженого шару (еквівалентний діаметр часток, порозність, критичну і фактичну швидкість повітря при кипінні, гідравлічний опір).

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основні теоретичні положення процесу псевдозрідження, область його застосування у переробній галузі;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальної лабораторної установки та іншим обладнанням робочого місця;
- ознайомитись з вимогами техніки безпеки при проведенні роботи;
- провести експериментальні дослідження згідно з методикою проведення роботи;
- обробити результати експерименту та сформулювати висновки;
- скласти та оформити звіт з лабораторної роботи.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** основні поняття з теорії процесу псевдозрідження двофазних систем;
- **знати:**
  - основні закономірності утворення псевдозрідженого шару, застосування ефекту псевдозрідження у технологічних процесах харчових і переробних виробництв;
- **вміти:** проводити налаштування лабораторної експериментальної установки і проводити дослідження з її використанням, обробляти результати експерименту, формулювати висновки, давати рекомендації з практичного використання ефекту псевдозрідження у виробництві.



### 3 Основні теоретичні положення

Псевдозрідженням називається такий стан двофазної системи тверді частки – газ (або рідина), який характеризується переміщенням твердих часток відносно одна одної за рахунок підведення енергії від якого-небудь джерела.

Сутність псевдозрідження полягає у тому, що під час продування газу (повітря) або рідини з певною швидкістю через шар зернистого матеріалу, що розташований на решітці, він переходить у завислий стан, набуває властивості текучості та переміщується. Зовні такий шар нагадує киплячу рідину, тому його ще називають киплячим шаром.

Процеси, що реалізуються у киплячому шарі, останнім часом одержали широке розповсюдження у різних галузях харчової технології. У псевдозрідженому шарі проводяться процеси змішування, теплообміну, сушіння, абсорбції та ін. Особливо часто інтенсивно впроваджується псевдозрідження у процеси сушіння зерна, цукру-піску, желатину, дріжджів та інших зернистих, а також рідинних матеріалів.

Тверді частки в киплячому шарі завдяки плинності можна переміщувати по трубах, що дозволяє створювати апарати безперервної дії, які порівняно прості, легко механізуються і автоматизуються.

Псевдозріджений шар утворюється при висхідному русі зріджувального агента через шар зернистого матеріалу зі швидкістю, що дозволяє підтримувати шар матеріалу в зваженому стані.

У повітряному потоці завислий шар зернистого матеріалу утворюється при використанні близьких за розміром округлих часток з еквівалентним діаметром від сотих частин міліметра (борошно, крохмаль) до декількох сантиметрів (драже, соя, горіхи). Для того, щоб усі частки переходили у зважений шар одночасно і не створювали окремих застійних зон або інтенсивного фонтанування, потрібно дотримуватися умови щоб вага окремих часток відрізнялася не більше ніж на порядок, а лінійний розмір (еквівалентний діаметр) часток при однаковій щільності не відрізнявся більше ніж у 2,14 рази.

Для встановлення гідродинамічної сутності процесу розглянемо три величини, що характеризують нерухомий шар зернистого матеріалу: порізність шару  $\varepsilon$ , висоту шару  $h$  і діаметр частинок  $d$ .

Порізність зернистого шару – це відношення вільного об'єму між зернами до всього об'єму шару:

$$\varepsilon = V_n/V = (V - V_m)/V = 1 - (V_m/V), \quad (1)$$

$V_n$  - вільний об'єм;  $V$  - повний об'єм шару;  $V_m$  - сумарний об'єм усіх твердих частинок.

Якщо газ рухається через шар зернистого матеріалу, то залежно від середньої швидкості його руху можливі три варіанти взаємодії (рисунок 1): фільтрування, псевдозрідження та транспортування завислих частинок потоком.

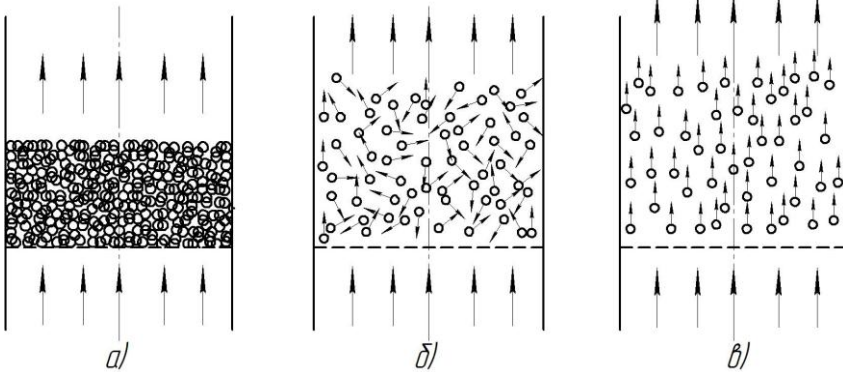


Рисунок 1 – Схема утворення псевдозрідженого шару

У стані фільтрації (рисунок 1 а) коли частинки зернистого шару залишаються нерухомими порізність шару  $\varepsilon$  залишається незмінною і дорівнює приблизно  $0,4$ .

Зі збільшенням швидкості газу до значення, при якому підймальна сила потоку стає рівною вазі шару часток, шар набуває текучості та переходить у псевдозріджений стан. Швидкість потоку  $v_1$ , що відповідає цьому моменту, називається першою критичною швидкістю, або швидкістю початку псевдозрідження (рисунок 1 б). При цьому значення порозності  $0,4 < \varepsilon < 1,0$ .

У такому стані шар становить систему, яка може бути прийнятою за дисперсну. Таким чином, псевдозрідження відносять до процесів утворення дисперсних систем.

За більшої швидкості потоку газу підймальна сила стає більшою за вагу шару, частки захоплюються потоком і починають переміщатися разом з ним тобто починається процес транспортування матеріалу (рисунок 1 в). Транспортування часток рідинним потоком називають гідротранспортом, а транспортування повітрям – пневмотранспортом. Швидкість  $v_2$ , яка відповідає цьому моменту, називається другою критичною швидкістю, або швидкістю винесення.

Залежність гідравлічного опору зернистого шару від середньої швидкості руху газу через шар наведена на рисунку 2.

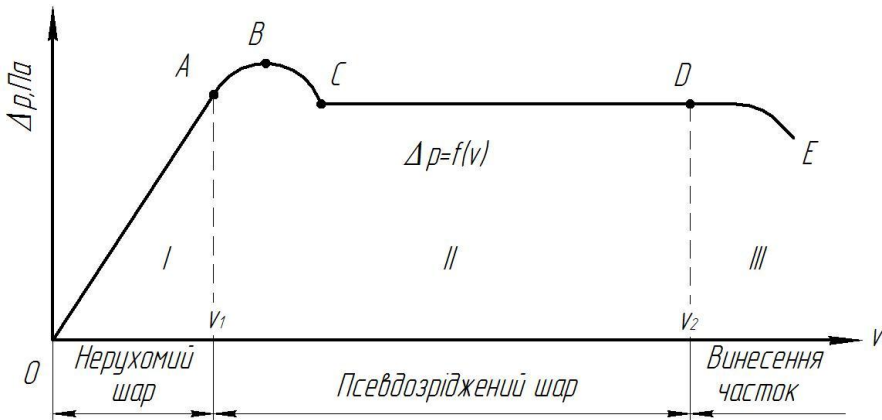


Рисунок 2 – Крива псевдозрідження для дисперсних часток

Гідравлічний опір псевдозрідженого шару – це різниця тиску газу під газорозподільною решіткою і на верхній межі шару:

$$\Delta p = p_1 - p_2 . \quad (2)$$

Середньою швидкістю газу є швидкість у вільному перерізі апарата:

$$v = 4Q_V / (\pi \cdot D^2) , \quad (3)$$

де  $Q_V$  - об'ємна витрата газу; D - діаметр циліндричного апарата.

Лінія ***OABCDE*** – є графік гідравлічного опору зернистого шару. На ділянці ***OA*** відбувається фільтрування газу через нерухомий зернистий шар. Потім у точці ***A*** шар починає розширюватись – утворюється псевдозріджений шар, а в точці ***B*** досягається максимум різниці тиску, яка потрібна для подолання зчеплення часток у зернистому шарі.

Лінія ***ABCD*** відповідає псевдозрідженому шару, гідравлічний опір якого постійний і не залежить від швидкості руху газу, яка змінюється у межах від  $v_1$  до  $v_2$  за рахунок змінення порозності. У точці ***D*** починається винесення завислих частино із шару і лінія ***DE*** на графіку відповідає початку процесу пневмотранспорту.

У зв'язку з тим, що частинки в шарі мають різні розміри, тобто шар є полідисперсним, перехід його у псевдозріджений стан відбувається поступово. Оптимальне (робоче) значення швидкості псевдозрідження  $v$ , що забезпечує інтенсивне перемішування киплячого шару є можливим з-за порозності частинок  $\varepsilon = 0,55...0,75$ . Відношення оптимальної швидкості  $v$  до першої критичної  $v_1$  називаються коефіцієнтом псевдозрідження:

$$K_n = v/v_1 . \quad (4)$$

Оптимальному зрідженню відповідає значення  $K_n = 2...3$ . Для кожного випадку  $K_n$  визначається експериментально.

Крім формули (1) величину порозності  $\varepsilon$  шару можна визначити за наступним виразом:

$$\varepsilon = \frac{H_{ш} - H_{тв}}{H_{ш}} , \quad (5)$$

де  $H_{ш}$  і  $H_{тв}$  - висота псевдозрідженого і твердого шару, м;

Коли всі частки шару перейдуть у зважений стан, тиск повітря під шаром  $\Delta p_c$  повинен подолати вагу часток, яка припадає на одиницю площі поперечного перерізу  $S$  апарата.

Таким чином:

$$\Delta p_{ш} = G_{ш} / S, \quad (6)$$

де  $G_{ш}$  - вага усіх часток шару, кг;

$S$  - площа поперечного перерізу колони апарата, м<sup>2</sup>.

З рівняння (6) випливає, що у період псевдозрідження гідравлічний опір шару  $\Delta p_{ш}$  не залежить від швидкості повітря, і залишається практично постійним в усьому діапазоні існування шару. Постійність значення  $\Delta p_{ш}$  пояснюється тим, що при підвищенні витрати повітря і його фіктивної швидкості  $v_{\phi}$  одночасно збільшується об'єм зваженого шару і відстань між частками, однак дійсна швидкість повітря, від якої залежить гідравлічний опір шару, не змінюється.

Під фіктивною швидкістю повітря  $v_{\phi}$  розуміють його об'ємну витрату  $V$  віднесену до площі поперечного перерізу апарата:

$$v_{\phi} = V / S, \quad (7)$$

де  $V$  – витрата повітря, м<sup>3</sup>/с;  $S$  - площа перерізу апарата, м<sup>2</sup>.

Еквівалентний діаметр часток  $d_e$  будь-якої форми знаходиться як діаметр кулі, яка за об'ємом дорівнює об'єму частки.

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi \cdot n \cdot \rho_{мс}}}, \quad (8)$$

де  $d_e$  - еквівалентний діаметр частки, м;  $m$  - маса часток у пробі, кг;  $n$  - кількість часток у пробі;  $\rho_{мс}$  - щільність твердих часток, кг/м<sup>3</sup>.

Середні значення щільності твердих часток деяких зернових матеріалів наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Середні значення щільності зернових матеріалів

Зерновий матеріал	горох	пшениця	просо	гречка
Значення $\rho_{мс}$ , кг/м <sup>3</sup>	1360	1320	1120	1040

Вимірявши розміри окремих округлих часток (зерен) можна знайти їх еквівалентний діаметр із меншою точністю за формулою:

$$d_e = k_\phi \cdot d_c, \quad (9)$$

де  $d_c$  - середній арифметичний діаметр часточок, м;

$k_\phi$  - коефіцієнт форми.

При розрахунках приймається: для пшениці  $k_\phi = 0,75$ , для ячменю  $k_\phi = 0,72$ , для гречки  $k_\phi = 0,77$ , для кукурудзи  $k_\phi = 0,79$ , для сої  $k_\phi = 0,92$ .

Для гідравлічного розрахунку апаратів із псевдозрідженим шаром використовують емпіричну критеріальну залежність Рейнольдса, тобто  $Re_{кр}$  – критичне значення числа Рейнольдса, при якому зернистий шар переходить у рухливий зважений стан:

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр} \cdot d_e \cdot \rho_{нв}}{\mu_{нв}}, \quad (10)$$

де  $\rho_{нв}$  і  $\mu_{нв}$  - щільність (кг/м<sup>3</sup>) і динамічна в'язкість (Па·с) повітря.

Критичне число Рейнольдса при значенні порозності  $\varepsilon = 0,4$  можна визначити за формулою О. Годеса.

$$Re_{кр} = \frac{A\tau}{1400 + 5,22\sqrt{A\tau}}, \quad (11)$$

де  $A\tau$  - критерій Архімеда.

$$A\tau = \frac{d_e^3 \cdot \rho_{нв} (\rho_{тв} - \rho_{нв}) g}{\mu_{нв}^2}. \quad (12)$$

Якщо щільністю повітря у різниці щільності твердих часток і повітря зневажити, то одержимо формулу

$$A\tau = \frac{d_e^3 \cdot \rho_{нв} \cdot \rho_{тв} \cdot g}{\mu_{нв}^2}. \quad (13)$$

Використовуючи наведені залежності, можна визначити значення  $A\tau$  і  $Re_{кр}$ , а потім швидкість повітря, при якій шар зернистого матеріалу переходить у зріджений стан.

#### 4 Оснащення лабораторної роботи пристроями і приладами

Робоче місце укомплектоване установкою для експериментального визначення параметрів процесу псевдозрідження (рисунок 3) та контрольно-вимірювальними приладами, як-то диференціальними манометрами, аналітичними вагами ВЛКТ-50М, штангенциркулем ШЦ-125 з межею вимірів 0...125 мм із точністю 0,1мм, лінійкою креслярською 0...300 мм, стаканчиками для зернового матеріалу, зернового матеріалу.

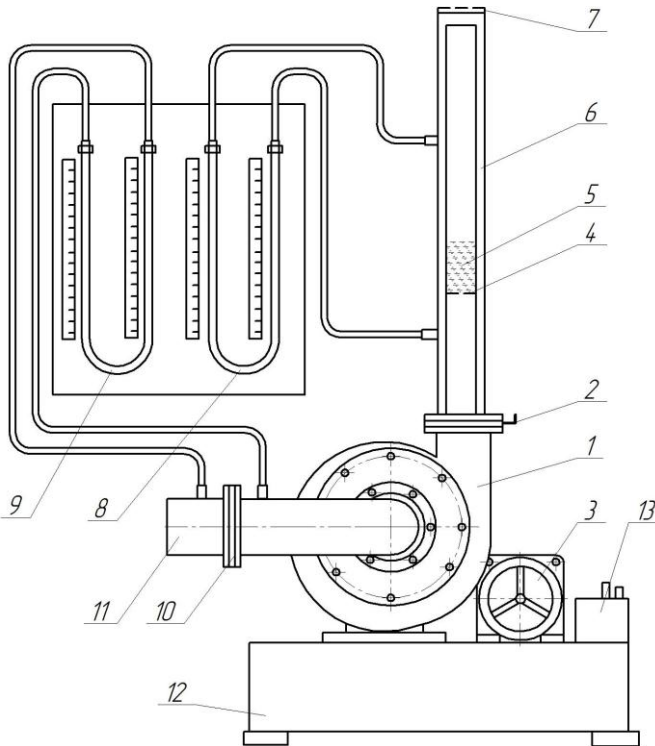


Рисунок 3 – Установка для дослідження процесу псевдозрідження

1 - вентилятор; 2 - заслінка; 3 - електродвигун; 4 - розпилювальна решітка; 5 - зерновий шар; 6 - колона; 7 - загороджувальна сітка; 8 - диференціальний манометр колони; 9 - диференціальний манометр діафрагми; 10 - діафрагма витратоміра повітря; 11 - усмоктувальний патрубок; 12 - основа установки; 13 - пусковий автомат.

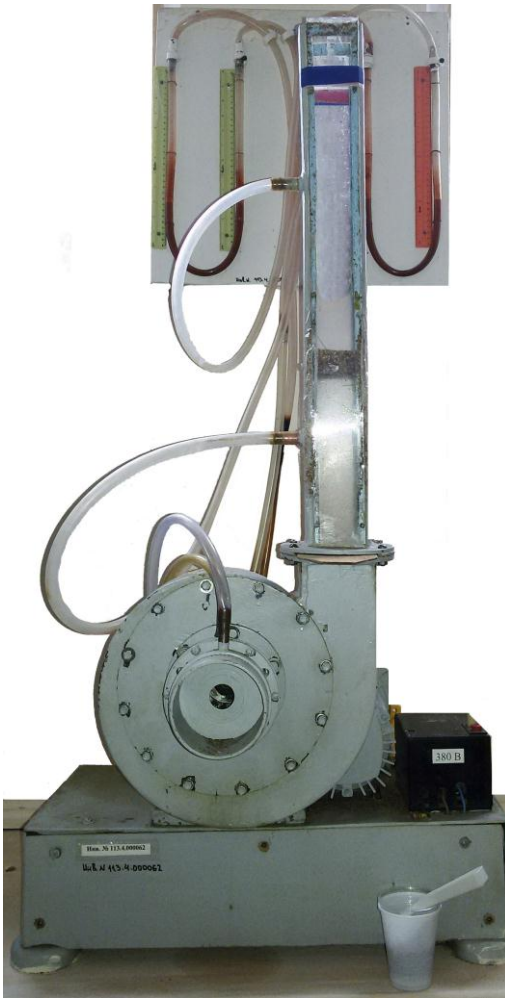


Рисунок 4 – Фото лабораторної установки

## 5 Методика проведення лабораторної роботи

1. Виконати тарування діафрагми 10. Для цього за допомогою заслінки діафрагми змінювати поперечний переріз усмоктувального каналу вентилятора. При кожному положенні заслінки слід фіксувати показання диференціального манометра діафрагми 9.

Лабораторна експериментальна установка для визначення параметрів процесу псевдозрідження складається з металоскляної колони 6.

Над газорозподільним простором колони встановлена розподільна решітка 4, на якій розміщується шар 5 зернового матеріалу.

У верхній частині колони закріплена сітка 7 для затримки зернистого матеріалу при його можливому виносі за межі колони.

Повітря у колону подається вентилятором 1 через діафрагму 10 і регулюється заслінкою 2. Витрата повітря визначається двома диференціальними манометрами 8 і 9, установленими на спеціальному стенді 11. Привод вентилятора здійснюється електродвигуном 12 за допомогою клинопасової передачі.



Для побудови тарувальної кривої число точок тарування повинне бути не менш п'яти.

Таблиця 1 – Дані тарування діафрагми установки

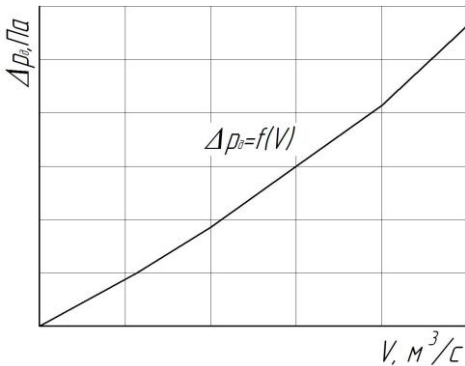
Номер досліду		1	2	3	4	5
$\Delta p_\delta$	в мм водяного стовпа					
	в Па					
$V$	м <sup>3</sup> /с					

Подача повітря  $V$  визначається за формулою:

$$V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_\delta}{\rho_{не}}} \quad (14)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт подачі, що залежить від типу і розміру звужуючого пристрою і фізичних властивостей потоку;  $\varepsilon$  - поправочний коефіцієнт розширення, що уводиться при вимірі витрати газів і пари;  $d$  - діаметр звужуючого пристрою.

За отриманими параметрами побудувати тарувальний графік діафрагми  $\Delta p_\delta = f(V)$



2. Визначити масу  $m$  часток у пробі зважуванням на аналітичних вагах ВЛКТ-50М.

3. Виміряти розміри 20 зерен досліджуваного матеріалу і розрахувати еквівалентний діаметр за виразом:

$$d_e = k \cdot d_c \quad (15)$$

Рисунок 3 – Графік визначення витрати повітря за перепадом тиску на діафрагмі

Для більш точного визначення еквівалентного діаметра зерен розрахувати його за формулою:

$$d_e = 3 \sqrt{\frac{6m}{\pi \cdot n \cdot \rho_{m6}}} . \quad (16)$$

4. Засипати зважену пробу зернового матеріалу в скляну колону б установки на решітку 4. Перед початком експерименту перевірити, щільність закриття заслінки 2.

5. Увімкнути вентилятор і при поступовому відкритті заслінки 2 встановити таку подачу повітря у колону, щоб показання дифманометра 8 було не більш ніж 100 Па (10 мм вод. ст.). Потім збільшити потік повітря таким чином, щоб перепад тиску у кожному наступному досліді збільшувався не більше ніж на 30...50 Па.

Подачу повітря збільшувати до настання режиму повного псевдозрідження з інтенсивним перемішуванням, не допускаючи віднесення часток угору до уловлювальної сітки. Закінчити досліді при настанні моменту виносу часток (точка **D** кривої псевдозрідження).

6. У кожному досліді заміряти висоту  $H_c$  зернового шару, гідравлічний опір часток  $\Delta p_{ш}$ , гідравлічний опір діафрагми  $\Delta p_{\phi}$  і записати характеристики зернового шару (нерухливий, набряклий, рухливий, псевдозріджений).

7. Експериментальні і розрахункові дані занести в таблицю 2.

Таблиця 2 – Параметри процесу псевдозрідження

Номер досліду	Висота шару $H_c$ , м	Гідравлічний опір шару $\Delta p_{ш}$ , Па	Гідравлічний опір діафрагми $\Delta p_{\phi}$ , Па	Подача повітря $V$ , м <sup>3</sup> /с	Швидкість повітря $v_{ср}$ , м/с	Характеристика стану шару
1						
2						
3						
4						
5						
6						

## 6 Обробка результатів експерименту

а) Визначити критерій Архімеда за формулою (12)

$$A\tau = \frac{d_e^3 \cdot \rho_g \cdot \rho_{m\phi} \cdot \rho_{n\phi} \cdot g}{\mu_{n\phi}^2}.$$

б) За формулою Тодеса (формула 11) визначити значення критичного числа Рейнольдса.

$$Re_{кр} = \frac{A\tau}{1400 + 5,22\sqrt{A\tau}}$$

в) Розраховуємо критичну теоретичну швидкість  $v_{кр.т}$  повітря, при якій зерновий шар переходить у псевдозріджений стан.

$$v_{кр.т} = \frac{Re_{кр} \cdot \mu_{n\phi}}{d_{\phi} \cdot \rho_{n\phi}}.$$

г) Знаючи перепад тиску діафрагми  $\Delta p_{\phi}$  за допомогою тарувального графіка знайти подачу повітря  $V$  і занести дані в таблицю 2.

д) Визначити фіктивну швидкість повітря  $v_{\phi}$  за формулою

$$v_{\phi} = \frac{V}{S},$$

де  $S$  - площа поперечного перерізу колони апарата, м<sup>2</sup>.

е) За експериментальними даними побудувати графік залежності  $\Delta p_c = f(v_{\phi})$ . За графіком визначити критичну швидкість  $v_{кр}$  початку псевдозрідження і критичну швидкість виносу  $v_{вин}$  для зернового матеріалу, що досліджується.

ж) Отримані експериментально і теоретично значення критичної швидкості повітря порівняти і знайти величину розбіжності.

$$\theta_v = \frac{v_{кр.ек} - v_{кр.теор.}}{v_{кр.ек}} \cdot 100\% \quad (17)$$

з) Охарактеризувати поведінку зернистого шару при різних швидкостях руху повітря (однорідність шару, ступінь і рівномірність перемішування, наявність повітряних пухирів, фонтанування).

## **7 Вимоги безпеки**

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## **8 Контрольні питання**

1 Окресліть сферу використання явища псевдозрідження у харчовій і переробній промисловості.

2 Крива псевдозрідження і її основні ділянки, їх характеристика.

3 Охарактеризуйте поняття фіктивної, дійсної і критичної швидкості повітря при псевдозрідженні?

4 Що являє собою порозність шару часток, і в яких межах її значення змінюється?

5 Назвіть основні етапи зрідження і стани псевдозрідженого шару.

6 Критичне число Рейнольдса, його сутність і застосування.

7 Що таке еквівалентний діаметр часток і яким чином його значення визначається?

8 Критерій Архімеда, його сутність і від яких складових залежить його значення?

9 Опишіть будову експериментальної лабораторної установки і порядок проведення дослідів на ній.

10 Чому зі збільшенням фіктивної швидкості повітря гідравлічний опір нерухливого шару зростає, а опір зваженого шару залишається постійним?

## **9 Тестові завдання**

**1) Яка різниця лінійного розміру часток при їх однаковій щільності гарантує стабільне досягнення ефекту псевдозрідження?**

а) в  $3,14^2$  разів;                      б) в 3,14 разів;                      в) в 2,14 рази.

**2) Як називають етап процесу псевдозрідження, коли шар часток залишається нерухомим і зберігає первинний об'єм?**

а) фільтрування;                      б) зріджування;                      в) транспортування.

**3) Як називають швидкість, при якій частки шару переходять у псевдозріджений стан?**

а) перша критична швидкість;                      б) друга критична швидкість;  
в) фіктивна швидкість.

4) Який етап на кривій псевдозрідження характеризує значення другої критичної швидкості?

- а) кінець фільтрування; б) кінець псевдозрідження;  
в) кінець транспортування.

5) Яким типом манометрів оснащена лабораторна експериментальна установка ?

- а) диференційного типу; б) деформаційного типу;  
в) дифракційного типу.

6) Вкажіть значення порозності часток, що при оптимальній швидкості забезпечує інтенсивне перемішування киплячого шару.

- а)  $\varepsilon < 0,4$ ; б)  $\varepsilon = 0,55 \dots 0,75$ ; в)  $\varepsilon > 1,0$ .

7) Вкажіть вірну формулу для визначення порозності часток.

- а)  $\varepsilon = (V - V_m) / V$ ; б)  $\varepsilon = 1 - (V_m / V)$ ; в) обидві формули.

8) Яка з наведених формул для визначення еквівалентного діаметра частки має більшу точність?

- а)  $d_e = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi \cdot n \cdot \rho_{me}}}$ ; б)  $d_e = k_\phi \cdot d_c$ ; в) обидві формули.

9) Яка з формул є формулою для визначення фіктивної швидкості?

- а)  $v = 4Q_V / (\pi \cdot D^2)$ ; б)  $v = R_{e,кр} \cdot \mu_{не} / (d_\partial \cdot \rho_{не})$ ; в)  $v = V / S$ .

10) Яким пристроєм регулюється подача повітря в установку?

- а) заслінкою; б) реостатом двигуна; в) манометром.

### Література

1. Черевко О.І. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. - Х.: Світ Книг, 2014. - 495 с.

2. Горбатюк В.И. Процессы и аппараты пищевых производств / В.И. Горбатюк. М.: Колос, 1999. - 335 с.

3 Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев.- М.: Колос, 2000. - 551 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ДО І ПІСЛЯ ЗАМОРОЖУВАННЯ

**Мета роботи:** Експериментальним шляхом визначити коефіцієнти тертя для умов сухого граничного тертя по дереву, гумі і сталі деяких видів свіжих, заморожених і дефростованих плодів.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основні теоретичні положення з природи і методів визначення коефіцієнта тертя спокою і руху;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальних установок для визначення коефіцієнта тертя спокою і руху;
- провести експериментальні дослідження з визначення коефіцієнта тертя спокою і руху зразків свіжої, замороженої та дефростованої рослинної продукції;
- обробити результати експерименту;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- оформити звіт по роботі і відзвітуватися перед викладачем.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** конспект лекцій за темою заняття та опрацювати рекомендовану літературу;

- **знати:**

1) область використання коефіцієнта тертя при розробці та модернізації технологічного обладнання переробної галузі;

2) основні способи визначення коефіцієнта тертя руху і спокою;

- **вміти:** проводити налаштування експериментальних установок для визначення коефіцієнта тертя, визначати залежності за темою дослідження, аналізувати результати досліджень.

### 3 Основні теоретичні положення

**Тертя** – процес взаємодії тіл при їх відносному рухові (зсуві) або при русі тіла в газоподібному або рідкому середовищі. По-іншому називається фрикційною взаємодією (англ. *friction*). Вивченням процесів тертя займається розділ механіки фрикційної взаємодії або трибології.

Вивчення природи тертя почалося в глибоку давнину, стародавні мислителі і винахідники постійно намагались зрозуміти і використати це явище.

Перші положення про закономірності зовнішнього тертя були викладені в роботі **Леонардо да Вінчі**, опублікованій у **1508** році.

Через майже **200** років теорія тертя була сформульована французьким ученим **Гійомом Амонтоном** у **1699** році, вона згодом була названа механічною теорією тертя. За нею сила тертя залежить від пружних і пластичних взаємодій нерівностей:

$$F_{mp} = F_N \cdot f \quad (1)$$

де  $F_N$  - нормальне навантаження;

$f$  - коефіцієнт тертя, обумовлений виразом:

$$f = \sigma_S / c \cdot \sigma_m$$

де  $\sigma_S$  - напруження зрізу,  $c$  - постійна величина ( $c=3$ ),

$\sigma_m$  - границя текучості матеріалу

У **1785** році **Шарль Кулон** розвив механічну теорію тертя, викладену Амонтоном, додавши у вираз (1) додаткову силу адгезійного схоплювання  $F_A$ :

$$F_{mp} = F_A + F_N \cdot f$$

Цей закон називають законом Амонтона-Кулона.

У **1935** році вітчизняний учений **Б. В. Дерягін** запропонував молекулярну теорію тертя:

$$F_{mp} = f(F_N + p_0 \cdot S)$$

де  $p_0$  - питома сила молекулярної взаємодії;  $S$  - площа контакту.

Надалі англійський фізик **Ф. Боуден** запропонував більш складне формулювання сили тертя, включивши в неї площі поверхонь контакту:

$$F_{тр} = F_з + F_n = \tau_з \cdot S_\phi + \tau_n \cdot S$$

де  $F_з$  - опір зрізу поверхонь контакту, Н;

$F_n$  - опір пластичним явищам між поверхнями контакту, Н;

$\tau_з$  - дотичні напруження зрізу, Н/м<sup>2</sup>;

$\tau_n$  - опір пластичної деформації, Н/м<sup>2</sup>;

$S_\phi$  і  $S$  - відповідно площа фактичного контакту і поперечного перерізу, м<sup>2</sup>.

У 1946 році **І.Г. Крагельський** розробив молекулярно-механічну теорію тертя:

$$F_{тр} = \tau_{мех} + \tau_{мол} = \alpha \cdot S_\phi + \beta \cdot F_N$$

де  $\tau_{мех}$  - механічна складова сили тертя;  $\tau_{мол}$  - молекулярна складова сили тертя;  $\alpha$  і  $\beta$  - постійні коефіцієнти.

В 1952 році професор **Дубинін А. Д.** сформулював енергетичну теорію тертя, по ній молекулярно-механічна теорія тертя доповнюється ще й законом енергій та їх перетворень.

На даний час наука **трибологія** успішно розвивається як вітчизняними, так і зарубіжними вченими І.В. Крагельським, Н.Б. Демкіним, Н.А. Буше, А.В. Чичинадзе, Б.І. Костецьким та ін. і охоплює все більшу область вивчення і результати цих досліджень впроваджуються у різні сфери матеріального виробництва.

**Сила тертя** – це зусилля, що виникає при контакті двох тіл і перешкоджає їхньому відносному руху. Причиною виникнення тертя є шорсткість поверхонь тертя і взаємодія молекул цих поверхонь. Сила тертя залежить від матеріалу поверхонь тертя і від того, наскільки сильно ці поверхні притиснуті одна до одної.

**Тертя ковзання** – сила, що виникає при поступальному переміщенні одного з контактуючих взаємодіючих тіл відносно іншого і діюча на це тіло в напрямку, протилежному напрямку ковзання.



*Тертя кочення* – момент сил, що виникає при коченні одного із двох контактуючих взаємодіючих тіл відносно іншого.

*Тертя спокою* – сила, що виникає між двома контактуючими тілами і перешкоджає виникненню відносного руху. Цю силу необхідно подолати для того, щоб привести два контактуючі тіла в рух одне відносно другого.

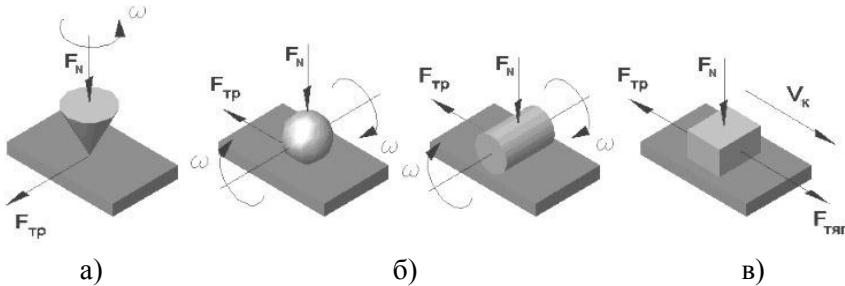


Рисунок 1 – Види тертя за кінематичними ознаками:  
а) тертя вістря (вертіння); б) тертя кочення; в) тертя ковзання.

Крім перерахованих видів тертя розрізняють також тертя статичне і кінематичне. Статичне тертя характеризується мінімальним зусиллям (при мікрозміщенні контактуючих тіл), необхідним для виведення одного з тіл у стан його відносного руху. Кінематичне тертя характеризується зусиллям, прикладеним до тіла, що рухається для підтримання постійної швидкості його руху.

Тертя прийнято розділяти на:

- *сухе*, коли взаємодіючі тверді тіла не розділені ніякими додатковими шарами мастила (у тому числі і твердими мастильними матеріалами) – випадок, що дуже рідко зустрічається на практиці; характерна відмітна риса сухого тертя – наявність значної сили тертя спокою;

- *граничне*, коли в області контакту можуть утримуватися шари і ділянки різної природи (окісні плівки, рідина і так далі) – найпоширеніший випадок при терті ковзання;

- *рідинне* (в'язке), що виникає при взаємодії тіл, розділених шаром твердого тіла (порошком графіту), рідини або газу (змащення) різної товщини – як правило, зустрічається при терті кочення, коли тверді тіла занурені в рідину, величина в'язкого тертя характеризується в'язкістю середовища;

- *змішане*, коли область контакту містить ділянки сухого і рідинного тертя;

- *еластогідродинамічне* (в'язкопружне), коли вирішальне значення має внутрішнє тертя у змащувальному матеріалі. Виникає при збільшенні відносних швидкостей переміщення.

**Коефіцієнтом тертя** називають коефіцієнт пропорційності, що пов'язує силу тертя  $F_{mp}$  і силу нормального тиску  $F_N$  тіла на опору. Тобто формула (1) є дійсною і застосованою на даний час.

Коефіцієнт тертя є сукупною характеристикою пари матеріалів, що контактують, і не залежить від площі контакту тіл. Він залежить від характеристик поверхонь, що труться, присутності на них забруднень, швидкості руху тіл відносно одне одного і т.д. Як правило, коефіцієнт тертя визначається емпірично.

Важливою характеристикою тертя є **кут тертя** – найбільший кут, який повна реакція утворює з нормаллю до поверхні. Цей кут відповідає мінімальному куту нахилу площини по відношенню до горизонту, при якому тіло, що лежить на цій площині, починає ковзати вниз під дією сили тяжіння.

Для більшості матеріалів, що утворюють пари тертя, значення коефіцієнта тертя визначені з достатньою точністю і включені до довідкової літератури.

Окрему специфічну групу матеріалів складають представники сільськогосподарської сировини і продуктів, які відзначаються великою різноманітністю і широким діапазоном фізико-механічних властивостей, у тому числі і коефіцієнта тертя, від значення якого залежить їхня здатність переміщатися на різних стадіях технологічного процесу як за допомогою транспортерів, так і під дією власної ваги.

Часто відомості про величину коефіцієнта тертя необхідні і при розрахунках опору подрібнюванню (різанню), інших процесів.

Таким чином, знання значень коефіцієнта тертя потрібне у процесі створення конструкцій машин і пристосувань для механізації переробки і зберігання сільськогосподарської продукції. Досить актуальне це питання і при розробці технологічних процесів зберігання із застосуванням методу низькотемпературного заморожування, на різних етапах якого (заморожування, зберігання, дефростація) продукт, що зберігається, тією чи іншою мірою змінює свої властивості.

У сучасній довідковій літературі значення коефіцієнта тертя для певних груп плодоовочевої продукції приводяться усереднено і найчастіше не відбивають конкретних умов одержання цих значень. У наукових публікаціях можна знайти розрізнені відомості про цей показник, але вони, як правило, приводяться для розв'язання або пояснення локальних завдань, що цікавлять дослідника. Тому слід зазначити, що найбільш повну картину змінення сил тертя між плодом і поверхнею контакту можуть дати тільки експериментальні дослідження коефіцієнта тертя.

#### **4 Оснащення лабораторної роботи механізмами і приладами**

Лабораторна робота оснащена двома лабораторними установками для визначення тертя 1) спокою і 2) тертя руху.

У якості контрольно-вимірювальних приладів і допоміжного обладнання використовується: 1) тахометр; 2) ваги 3) набір гир (50 г, 75 г, 100 г, 125 г, 150 г); 4) рівень; 5) змінні поверхні тертя (дерев'яна, гумова, сталева) для обох лабораторних установок.

Як об'єкти дослідження використовуються плоди (баклажанів, солодкого перцю та ін.), свіжі, заморожені та після розморожування на повітрі або у воді.

Коефіцієнт тертя спокою плодоовочевої продукції визначається на установці, схема якої показана на рисунку 2.

Установка складається з похилої площини 1, регульовального гвинта 2 і лінійки 3.

Плід 4 поміщається на похилу площину 1 (гіпотенуза), а за допомогою гвинта 2 кут  $\varphi$  збільшується поки, плід не починає ковзати по похилій площині. У цей час по лінійці 3 вимірюється катет.

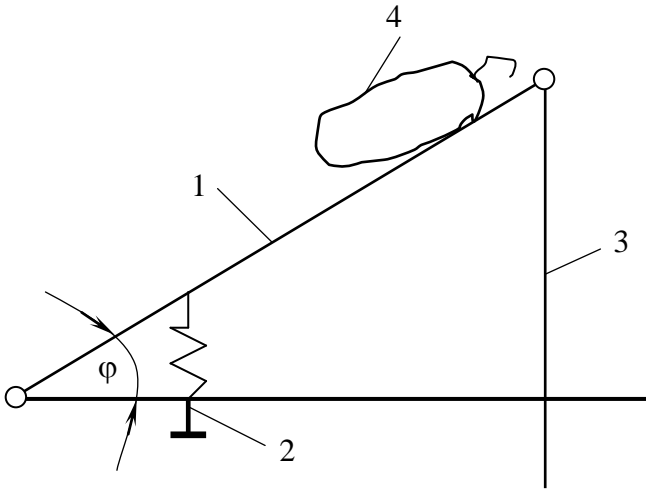


Рисунок 2 – Схема установки для визначення коефіцієнта тертя спокою

1 - похила площина; 2 - регулюючий гвинт; 3 - лінійка; 4 - плід.

Кут тертя визначається за виразом:

$$\varphi = \arcsin \frac{k}{c}, \quad (2)$$

де:  $k$  – катет, що вимірюється, мм;

$c$  - гіпотенуза (величина її для установки постійна)

Коефіцієнт тертя спокою визначається як:

$$f = \operatorname{tg} \varphi. \quad (3)$$

Коефіцієнт тертя спокою визначається по дереву, гумі і сталі, для чого установка укомплектована змінними поверхнями тертя.

Дані поверхні вибрані у зв'язку з тим, що транспортуючі і завантажувальні пристрої переробного обладнання виготовлені, в основному, з цих матеріалів.



Рисунок 3 – Фото установки для визначення тертя спокою

Визначення коефіцієнта тертя руху проводилося на відомому приладі І.В. Крагельського. Для підвищення стабільності показань і спрощення керування клиноремінний варіатор приладу був замінений відповідною клиноремінною передачею з постійним передаточним числом. Плавне ж регулювання частоти обертання диска здійснюється за рахунок застосування електродвигуна постійного струму, підключеного за реостатною схемою через випрямляч до звичайної однофазної електричної мережі.

Схема установки показана на рисунку 4.

Об'єкт випробування (плід баклажана, гроно винограду або фрагмент плода гарбуза) 1 укладається на поверхню диска 2, який обертається навколо вертикальної площини через клинопасову передачу 3 від електродвигуна постійного струму 4.

Плід за допомогою нитки 5 з'єднаний з пером самописця 6, яке переміщається по стрічці 7 на відстань, обумовлену деформацією тарованої вимірювальної пружини 8.

Диск приладу має пристрої для швидкої заміни та кріплення його змінного покриття, яке імітує різні види поверхонь тертя, зокрема, дерево, метал (сталь) і гума.

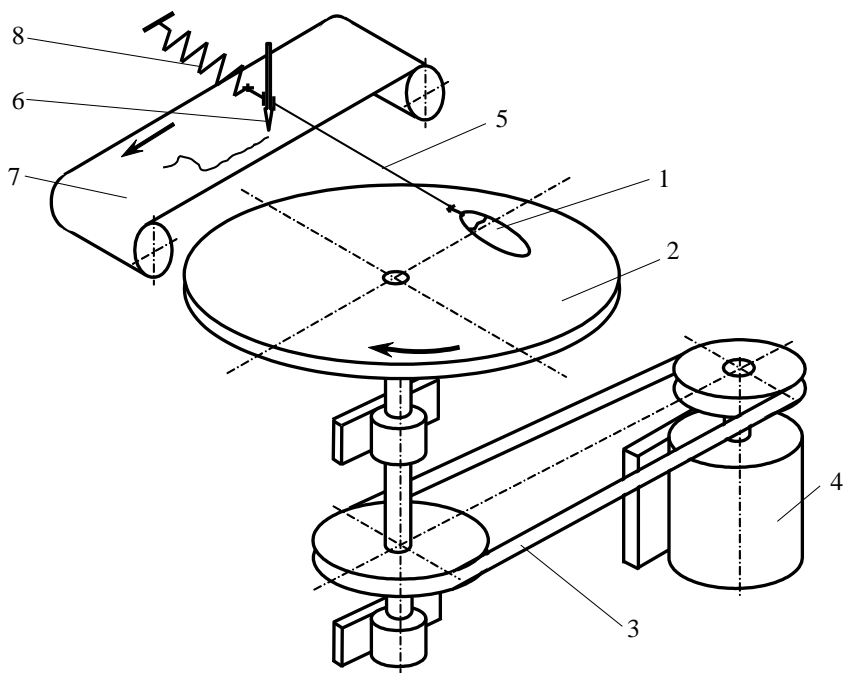


Рисунок 4 – Прилад для дослідження коефіцієнта тертя руху

1 - об'єкт випробувань (плід); 2 - диск; 3 - клинопасова передача; 4 - електродвигун постійного струму; 5 - нитка; 6 - перо самописця; 7 - вимірвальна пружина; 8 - стрічка самописця; 9 - привод самописця.

Запис зусилля тертя проводиться на стрічку з міліметрового паперу шириною 50 мм. Привод самописця також має безступінчасте регулювання переміщення стрічки. Це дає можливість узгодження швидкостей диска і паперу і, тим самим, одержання достовірної інформації про динаміку зміни зусилля тертя.

З метою встановлення залежності сили тертя від ваги об'єкта (нормального зусилля тиску) дослідження можна проводити за допомогою спеціально підготовлених зразків. Для цього маса плодів збільшувалась за допомогою металевих вставок (вантажів), впроваджуваних у м'якоть плода, не ушкоджуючи при цьому тертьові поверхні й не змінюючи положення його центра ваги.

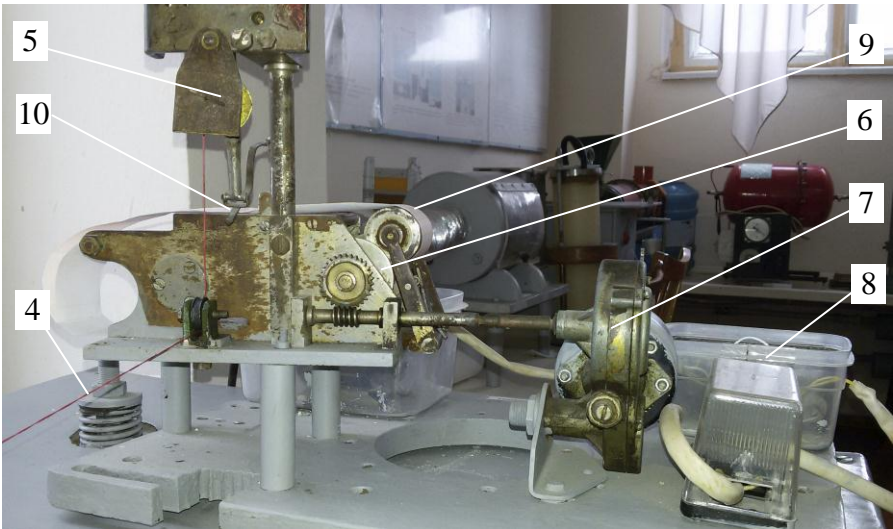


Рисунок 5 – Фото приладу для дослідження тертя руху

1 - диск; 2 - приводний вал диска; 3 - об'єкт дослідження; 4 - нитка;  
 5 - навантажувач; 6 - механізм протягування стрічки; 7 - привод самописця; 8 - електрообладнання; 9 - стрічка; 10 - перо самописця.

## 5 Методика проведення експерименту

Коефіцієнт тертя визначається для сухого і граничного (змішаного) тертя свіжого, замороженого і розмороженого плоду по дереву, гумі і сталі.

### 5.1 Визначення коефіцієнта тертя спокою

1 Виміряти довжину гіпотенузи (величина для усіх дослідів постійна) і занести в таблицю 1.

2 Помістити на установку для визначення коефіцієнта тертя спокою (рисунок 3) продукт, що досліджується.

3 За допомогою регульовального гвинта 2 збільшувати кут  $\varphi$  (рисунок 2), поки продукт не почне ковзати по похилій площині.

4 Виміряти довжину катета  $k$  за допомогою лінійки 3 (рисунок 2) і занести дані в таблицю 1.

5 Повторити пункти 2. 3 і 4 п'ять разів.

Таблиця 1 – Параметри для визначення коефіцієнта тертя спокою.

Стан плоду	Матеріал покриття	Гіпотенуза	Катет $k$ , мм (за дослідями)						Кут тертя, $\varphi^\circ$	Коефіцієнт тертя, $f$
			1	2	3	4	5	ср.		
Свіжий	дерево									
	гума									
	сталь									
Заморожений	дерево									
	гума									
	сталь									
Дефростований	дерево									
	гума									
	сталь									

6 Замінити покриття похилої площини і повторити експеримент у тій же послідовності.

7 Визначити середнє значення катета по п'яти дослідях і розрахувати кут тертя  $\varphi$  за формулою (2) і результати занести в таблицю 1.

8 Розрахувати коефіцієнт тертя спокою за формулою (3) і занести його значення у таблицю 1.



## 5.2 Визначення коефіцієнта тертя руху

Визначення коефіцієнта тертя руху проводиться при робочих швидкостях руху продукту.  $V_1 = 0,75$  м/с;  $V_2 = 1,0$  м/с;  $V_3 = 1,5$  м/с;

1 Провести тарування навантажувальної пружини, для чого:

Розвернути раму блоку навантаження у положення для тарування. Заправити самописець стрічкою з міліметрового паперу шириною 50 мм. Тарування проводиться шляхом послідовного навішування на нитку 4 вантажів (гир) відповідної ваги. Для кожного вантажу вмикається самописець і проводиться тарувальна пряма, включаючи і пряму з нульовим навантаженням (рисунок 6).

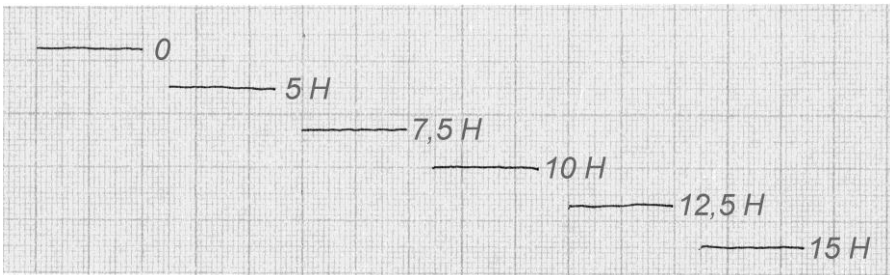


Рисунок 6 – Зразок стрічки з записом тарування пружини

2 Визначити частоту обертання для кожного режиму дослідження шляхом визначення відповідної частоти обертання диска за формулою:

$$n_i = 60 \cdot V_i / (\pi \cdot D), \quad (4)$$

де  $V_i$  - робоча швидкість руху продукту при випробуванні, м/с;

$D$  - діаметр кола на диску, на якому розташовується продукт, м.

Значення  $D$  визначається заміром безпосередньо на диску.

3 Встановити за тахометром частоту обертання, необхідну для першої серії дослідів (при  $V_1 = 0,75$  м/с). Потрібна частота обертання виставляється за допомогою реостата керування електродвигуном постійного струму.

4 Встановити на диск приладу перший тип покриття (дерево), укласти на відмітку відповідного діаметра диска плід і з'єднати його з ниткою приладу.

5 Увімкнути одночасно електродвигун привода диска і електродвигун самописця. Записати на стрічку самописця зусилля, виникаючі на нитці від сил тертя плоду об покриття диска.

6 Повторити досліди за пунктами 4 і 5 з плодами в іншому стані (заморожені, дефростовані).

7 Замінити покриття диска на гумове, потім сталеве і повторити експерименти у тій же послідовності.

8 Після проведення першої серії дослідів провести другу і третю серії, змінивши швидкості випробувань (див. п. 3).

9 Записати отримані дані за результатами дослідів у таблицю 2.

## 6 Обробка результатів експериментів.

1 Визначити масштаб (Н/мм) запису амплітуди зусилля тертя на стрічці самописця.

$$\mu = m_g \cdot g / l, \quad (5)$$

де  $m_g$  - маса вантажу при таруванні, кг;

$l$  - відстань на стрічці між нульовою лінією і лінією, відповідною тарувальному вантажу, мм;

$g$  - прискорення вільного падіння.

2 Заміряти величину амплітуди зусилля тертя на стрічці самописця і занести дані в таблицю 2.

3 Визначити середні значення амплітуди зусилля тертя, мм:

$$A_{cp} = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5}{5}. \quad (6)$$

4 Визначити зусилля тертя (Н) для різних покриттів при різних швидкості руху:

$$F_{mp} = A_{cp} \cdot \mu, \quad (7)$$

де  $A_{cp}$  - середнє значення амплітуди, мм;

$\mu$  - масштаб запису, Н/мм;

Таблиця 2 – Результати експериментальних досліджень за визначенням коефіцієнта тертя руху

Стан продукту	Поверхня диска	Частота обертання $n$ , об/хв.	Амплітуда відмітки на стрічці $A$ , мм (за дослідями)					Сила тертя, Н	Коефіцієнт тертя $f_p$		
			1	2	3	4	5			$A_{cp}$	
Свіжий	Дерево										
		Гума									
			Сталь								
Заморожений	Дерево										
		Гума									
			Сталь								
Після дефростації	Дерево										
		Гума									
			Сталь								

5 Розрахувати нормальне зусилля тиску плоду на покриття диска, Н:

$$F_N = m_n \cdot g, \quad (8)$$

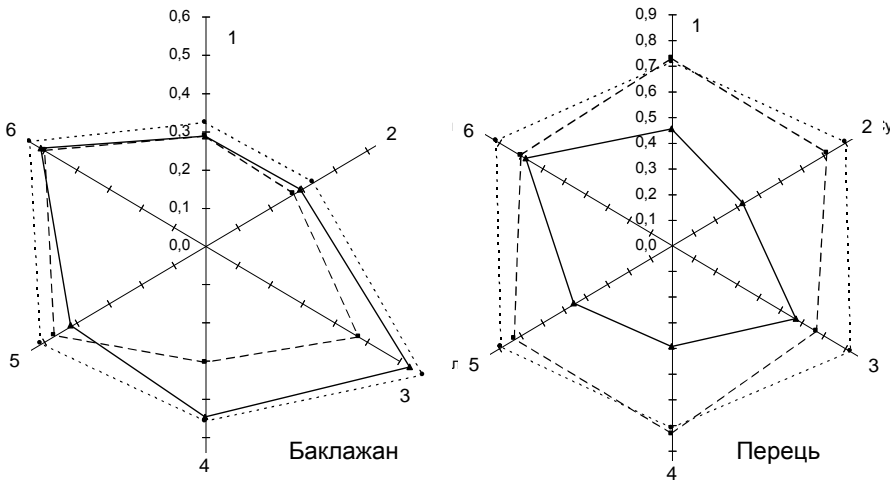
де  $m_n$  - маса плоду, кг;

6 Визначити коефіцієнт тертя руху за формулою:

$$f_{mp.p} = F_{mp} / F_N. \quad (9)$$

Одержані експериментальні і розрахункові дані занести в таблицю 2 та зробити висновки.

За результатами визначення коефіцієнта тертя спокою побудувати пелюсткові діаграми за зразком, представленим на рисунку 7.



Об'єкт: ——— - свіжий; - - - - - заморожений; ······ - розморожений

Рисунок 7 – Зразок побудови пелюсткових діаграм за результатами визначення коефіцієнта тертя спокою

### 7 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## 8 Контрольні питання

- 1 Охарактеризуйте поняття явища „тертя“.
- 2 Які закони лежать в основі теорії тертя?
- 3 Дайте визначення терміну „сила тертя“.
- 4 Перерахуйте види тертя за характеристикою взаємодії тіл, які ви знаєте?
- 5 У чому різниця між статичним і кінематичним тертям?
- 6 За яким принципом працює установка для визначення коефіцієнта тертя спокою?
- 7 Укажіть взаємозв'язок між кутом тертя і коефіцієнтом тертя.
- 8 Поясніть принцип дії приладу І.В. Крагельського для визначення коефіцієнта тертя руху.
- 9 Наведіть порядок тарування силової пружини приладу визначення коефіцієнта тертя руху.
- 10 Наведіть порядок обробки результатів дослідів по визначенню коефіцієнта тертя.

## 9 Тестові завдання

1) Від яких факторів залежить значення сили тертя за законом Г. Амонтона?

- а) ...залежить від пружних і пластичних взаємодій нерівностей;
- б) ...залежить від сил взаємного тяжіння двох тіл, що контактують;
- в) ...залежить від сили тяжіння і площі тіл, що контактують.

2) Яким зусиллям сила тертя Г. Амонтона доповнена згідно з законом Шарля Кулона?

- а) додатковою силою атмосферного тиску;
- б) додатковою силою адгезійного схоплювання  $F_A$ ;
- в) додатковою силою зминання нерівностей шорсткості.

3) Вкажіть вірну формулу, що відображає взаємозв'язок між коефіцієнтом тертя і кутом тертя.

- а)  $f = \arctg \varphi$  ;            б)  $f = tg \varphi$  ;            в)  $f = \cos \varphi$  .

4) Вкажіть формулу закону Г. Амонтона.

- а)  $F_{mp} = A_{cp} \cdot \mu$  ;    б)  $F_{mp} = F_N \cdot f$  ;    в)  $F_{mp} = F_A + F_N \cdot f$



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ПЛОДАХ ПРИ ЗАМОРОЖУВАННІ І ДЕФРОСТАЦІЇ

**Мета роботи:** Експериментальним шляхом визначити швидкість і час пошарового заморожування та дефростації плодів і фруктів. Встановити оптимальне середовище для заморожування і дефростації.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- ознайомитись з теоретичними відомостями про основні способи заморожування плодоовочевої продукції та її дефростації;
- розглянути принцип дії та будову експериментального обладнання для встановлення закономірностей процесів заморожування і дефростації продуктів;
- оволодіти методикою проведення лабораторної роботи;
- провести досліди по вивченню температурних полів по шарах зразків плодоовочевої продукції;
- обробити результати експерименту і побудувати графічні залежності за результатами дослідів;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- оформити звіт по роботі і зарахувати його у викладача.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** відповідну тему конспекту лекцій за темою заняття та переглянути рекомендовану літературу;

- **знати:**

- основні методи заморожування і дефростації сільськогосподарської продукції;

- **вміти:** проводити налаштування лабораторного обладнання, користуватись контрольними приладами, встановлювати залежності за темою дослідження, аналізувати результати.

### 3 Основні теоретичні положення

Сучасна технологія консервації заснована на методах обробки, за допомогою яких можна направлено впливати на мікрофлору, активність ферментів і розвиток фізико-хімічних процесів. Ці методи мають велике практичне значення. Гальмування розвитку процесів може бути частковим або повним.

Серед різних методів консервації особливо важлива роль відведена методам, заснованим на дії низьких температур, тобто, охолодженню і заморожуванню харчових продуктів. Ці методи є загальними для багатьох галузей харчової промисловості. Зрештою поліпшується ритмічність постачання населення продуктами, підвищується якість продуктів, і обмежуються втрати.

Заморожування це процес часткового або повного перетворення води, що втримується у продукті, в лід. При цьому відвід тепла від речовини, яку заморожують, супроводжується зниженням його температури. Отже, головна особливість заморожування складається у фазовому перетворенні води в лід, а відвід теплоти представляє необхідну умову такого перетворення.

Сукупність двох явищ, що протікають спільно, – льодоутворення та зниження температури і визначає фізичні особливості та можливості подальшого технологічного використання заморожування харчових продуктів.

У технологічному відношенні заморожування викликає зміни в продукті, що перешкоджають повному відновленню первісних властивостей. Тому при заморожуванні харчових продуктів з метою додання їм нових характеристик потрібно, щоб процес був виконаний, виходячи з урахування первісних властивостей продукту.

На рисунку 1 представлена узагальнена картина зміни температури системи на усіх стадіях кріотропного структуроутворення при заморожуванні, перебуванні в замороженому стані і розморожуванні.



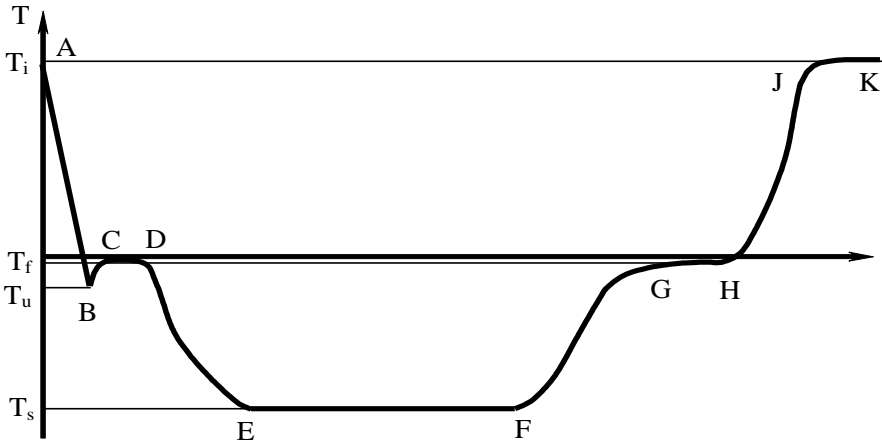


Рисунок 1 – Узагальнена термограма процесу криотропного структуроутворення

Ділянка **A-B** відповідає охолодженню зразка від вихідної температури  $T_i$  до температури початку кристалізації.  $T_u$  (температури переохолодження). На ділянці **C-D** за рахунок виділення прихованої теплоти кристалізації льоду звичайно реєструється „плато кристалізації“. Між точками **D** і **E** відбувається подальше зниження температури до заданого значення ( $T_s$ ). Ділянка **F-G-H** характеризується наростанням температури в результаті підведення тепла до зразка (процес розморожування). Далі на ділянці **H-K** відбувається підвищення температури зразка до заданого значення.

У світовій холодильній практиці для швидкого заморожування харчових продуктів застосовується доволі широкий спектр методів заморожування та відповідних їм технічних засобів. Методи заморожування умовно можна розділити на три основні групи:

- 1) метод прямого контакту харчового продукту із холодоагентом;
- 2) метод використання вторинного середовища (холодоносія), що охолоджується холодоагентом у спеціальних теплообмінниках;
- 3) метод прямого контакту продукту, що заморожується, з холодоагентом через металеву поверхню.

Методи заморожування першої групи, які використовують рідкі, тверді та газоподібні холодоагенти, об'єднані загальною назвою – *криогенні*.

Друга група методів використовує рідкі та газоподібні холодоносії. У випадку застосування рідких холодоносіїв (розчинів хлоридів кальцію і натрію, пропіленгліколю, спиртових розчинів та т.д.) реалізують заглибний метод заморожування, а у випадку використання газоподібного холодоносія (головним чином, це повітря) повітряний метод. У вітчизняній промисловості повітряний метод заморожування одержав найбільше поширення, як найменш енергоємний процес.

Третю групу утворюють методи, засновані на контакті продукту та холодоагента через металеву поверхню, які використовують, в основному, для продукту правильної геометричної форми.

*Криогенне заморожування.* У сучасній промисловості для заморожування харчових продуктів найчастіше використовують наступні криогенні агенти: рідкий азот, діоксид вуглецю та фреони (фторхлоргидроуглероди, фторогидроуглероди та інші криогенні рідини).

Найбільше поширення для заморожування штучних харчових продуктів одержав рідкий азот, який характеризується високим ступенем відносної інертності, низькою температурою та здатністю до поглинання великої кількості теплоти на одиницю своєї маси.

Найчастіше рідкий азот використовують для заморожування харчових продуктів у швидкоморозильних апаратах тунельного типу. Температура замороженого продукту при виході з тунелю становить мінус 30...35 °С. Конструкція тунельних швидкоморозильних апаратів є типовою для усіх конструкцій, які застосовують для заморожування різних продуктів рослинного і тваринного походження. Основні переваги апаратів цього типу – їхня дешевизна, простота конструкції та висока швидкість заморожування продукту.

Однак витрати на заморожування цим способом у 3...5 разів вищі, ніж при інших способах заморожування, що пояснюється, у першу чергу, високою вартістю самого рідкого азоту. Вартість рідкого азоту становить більше 60% усіх витрат при використанні даного способу заморожування. Таким чином, вартість заморожування азотним способом визначається, в основному, витратами рідкого азоту.

При заморожуванні в рідкому азоті проходження температурного інтервалу мінус 1...5 °С (зона криоскопічної температури) досягається усього за 3...9 хвилин. При використанні рідкого азоту для заморожування продукту товщиною 1 см буде потрібно часу в середньому 5 хв., товщиною 2 см – 8 хв., товщиною 4 см – 17 хвилин.

Одна з переваг використання рідкого азоту для заморожування харчових продуктів – незначний відсоток втрати маси продукту при заморожуванні (усушка), а також здатність утворювати мілкокристалічну структуру вільно зв'язаної вологи, що сприяє максимальному збереженню природних властивостей продукту.

Кріогенний метод заморожування із застосуванням діоксиду вуглецю також привертає увагу. Заморожування здійснюють, впливаючи на продукт холодним газовим і рідким середовищем, або ж створюючи суміш із газу та диспергованої у ній твердої вуглекислоти.

З метою максимального використання теплоти сублімації продукт покривають „сніговою шубою“, яку одержують після дроселювання рідкого вуглекислого газу. У ряді випадків твердий діоксид вуглецю використовують у вигляді дрібних гранул.

Температура охолоджувального середовища залежить від принципу організації процесу заморожування діоксидом вуглецю. У газовому середовищі її підтримують в інтервалі від мінус 20 до мінус 70 °С. При охолодженні „снігом“ або гранулами температура становить мінус 78,9 °С. Теплота сублімації твердого вуглекислого газу дорівнює 575 кДж/кг, тоді як теплота паротворення рідкого азоту 199,71 кДж/кг. Великі перепади температур між продуктом і холодоагентом, а також відвід теплоти сублімації твердого діоксиду вуглецю дозволяє досягати високих швидкостей заморожування без деформаційних змін у структурі замороженого продукту.

Також діоксид вуглецю можна застосовувати для контактного заморожування будь-яких харчових продуктів, тим більше, що він має бактерицидні властивості, служить ефективним засобом для придушення розмноження анаеробних та аеробних бактерій, а також дозволяє одержувати невеликий відсоток усушки (1,0...0,5%) замороженого продукту.

Узагальнюючи наведену інформацію із криогенного методу заморожування харчових продуктів, можна відмітити, що основний недолік цього методу – висока вартість самих криогенних холодоагентів.

*До другої групи способів* відносять повітряний метод заморожування. Повітряне заморожування є найпоширенішим у багатьох країнах сучасного світу. Швидкість заморожування у повітряному середовищі залежить від розміру продукту, температури середовища та швидкості її циркуляції.

У повітряних морозильних апаратах (ПМА) при застосуванні одного й того охолоджуючого блока існують два варіанти вантажного блока із площинною і просторовою схемами переміщення продукту. По першій схемі компонуються апарати безперервно-циклічної дії (візкового типу), по другій – апарати безперервної дії зі стрічковим або спіральним конвеєром. Плоди і овочі укладаються розсипом на конвеєрну стрічку та заморожуються у повітрі з температурою мінус 30...мінус 40 °С і швидкістю руху 3...5 м/с. При цьому втрати маси становлять від 0,9 до 2,0%, а у випадку заморожування у камерах – до 4%.

Одним з головних напрямків інтенсифікації обробки продуктів у повітряному середовищі є флюїдизаційне заморожування. Процес може бути прискорений внаслідок підвищення інтенсивності теплообміну, при цьому знижується усушка (до 0,5...0,8%) і поліпшуються санітарно-гігієнічні показники виробництва. Даний спосіб має обмеження при застосуванні внаслідок складності заморожування великогабаритних продуктів, а також труднощів, пов'язаних з визначенням оптимальної швидкості руху середовища.

Заморожування харчових продуктів у повітряному середовищі має наступні недоліки, а саме: низький коефіцієнт тепловіддачі (не більш 50 Вт/(м<sup>2</sup>·К) при флюїдизаційному заморожуванні), підвищення якого пов'язане з необхідністю значного збільшення швидкості руху охолоджувального середовища, що, у свою чергу, викликає істотний приріст експлуатаційних витрат, металоємності устаткування та збільшення його габаритних розмірів. У той же час порівняно велика тривалість процесу заморожування викликає невиправдано високі втрати маси заморожених продуктів (до 3...4%).

Заморожування зануренням у некиплячу рідину досліджували ще в XIX в., але більш детально його почали вивчати з 30-х років XX в. Відзначається висока ефективність умов теплообміну, при цьому використовується недороге устаткування, просте в обслуговуванні, що легко піддається автоматизації.

У якості некиплячої рідини використовують холодні розчини солей, в основному хлориду натрію, хлориду кальцію, пропіленгліколю, етилового спирту та ін. Метод занурення у некиплячі рідини застосовують для безконтактного або контактного заморожування штучних харчових продуктів.

До основних недоліків контактного способу, що передбачає заморожування у некиплячій рідині, варто віднести проникнення холодоносія у продукт. Дана обставина приводить до окислювання жирів і негативно впливає на його смак. При цьому строки зберігання замороженого продукту значно скорочуються. Проникнення солі в продукт тим слабкіше, чим нижча температура розчину; воно припиняється при евтектичній точці холодоносія.

В останньому десятилітті для холодильної обробки продуктів харчування застосовують двофазні холодоносії. Вони мають різні торговельні назви: бінарний лід, айс-сларрі, flow ice, liquide ice та ін., і являють собою льодові суспензії.

Застосування способів, які відносять до третьої групи, для заморожування рослинних продуктів обмежене. Іноді плоди і овочі заморожують у плиткових апаратах, що швидше, ніж у повітряних, але створює незручності при подальшому використанні цих блоків. Рослинну продукцію заморожують у такий спосіб тільки у випадку подальшої її глибокої промислової переробки.

З теплофізичних завдань по заморожуванню найбільш важливим є визначення тривалості цього процесу, що базується на формулі Р.П. Планка, яка модифікувалася часто і багатьма дослідженнями, але навіть у наші дні вона все ще використовується для розрахунку тривалості заморожування у своєму первинному вигляді.

Планк виходив з положення, що однорідне тіло, яке містить воду, перед початком заморожування охолоджують до криоскопічної температури. Утворення льоду відбувається без переохолодження води і розвивається ізотермічно при криоскопічній температурі.

Теплофізичні властивості замороженого тіла не залежать від температури, теплоємність замерзлої частини тіла рівна нулю. Замерзання відбувається завдяки відбору тепла з поверхонь тіла при постійному коефіцієнті теплопередачі і постійній температурі охолоджуючого середовища.

За формулою Планка час заморожування баклажан визначається як:

$$\tau = \frac{q_3 \cdot \rho \cdot \delta}{58 \cdot \lambda_m \cdot \Delta t} \cdot \left( \delta + \frac{4 \cdot \lambda_m}{\alpha} \right) \cdot 60$$

де  $\tau$  - час заморожування, хв.;

$q_3$  - теплота заморожування;  $q_3 = \varphi \cdot \omega \cdot r_3$ , кДж/кг;

$\varphi$  - вологість продукту;

$\omega$  - частка вимороженої води;

$r_3$  - питома теплота твердіння ( $r_3 = 335 \dots 400$  кДж/кг);

$\rho$  - щільність продукту, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  - діаметр циліндра, м;

$\lambda_m$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/м·К;

$\Delta t$  - різниця між криоскопічною температурою продукту і температурою охолоджуючого середовища, °С.

Для баклажан вологість складає ( $\varphi = 0,8 \dots 0,87$ ; щільність  $\rho = 560 \dots 770$  кг/м<sup>3</sup>; діаметр  $\delta = 0,04 \dots 0,1$  м; коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_m = 0,26 \dots 0,4$  Вт/м·К.

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  визначають за рівнянням:

$$\alpha = 6,2 + 4,2 \omega$$

де  $\omega$  - швидкість конвективного переміщення теплоносія ( $\omega = 0,15$  м/с).

#### 4 Оснащення лабораторної роботи обладнанням і приладами

- 1 Холодильна камера;
- 2 Установка для криїгенного заморожування;
- 3 Потенціометр КВ-1, п'ятиканальний укомплектований п'ятьма хромель-копелевими термопарами;
- 4 Пристосування для проколювання баклажан;
- 5 Секундомір; 6 Ємності для розсолу та води для дефростації.

Для проведення заморожування у повітряному середовищі та охолодження розсолу застосовується стаціонарна холодильна камера або побутовий морозильник (лар) з температурою не менш ніж  $-24^{\circ}\text{C}$ .

У лабораторних дослідях по криїгенному заморожуванню у рідкому азоті або його парах використовувалася посудина Дьюара „Харків-31“ об'ємом 30 літрів рідкого азоту з горловиною шириною 600 мм (рисунок 2), що дозволяє опускати в нього плоди з наперед встановленими на них термопарами.

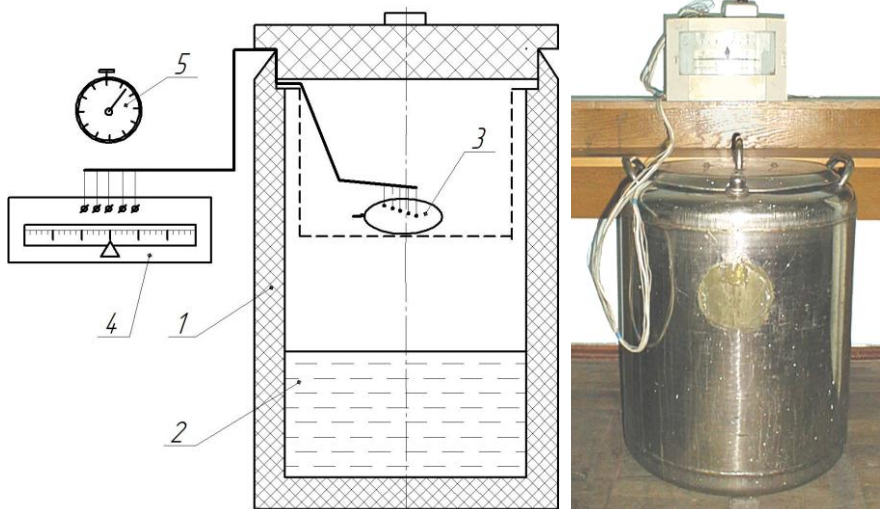


Рисунок 2 – схема і фото лабораторної установки криїгенного заморожування .

- 1 - посудина Дьюара „Харків – 31“; 2 - рідкий азот; 3 - дослідний плід;
- 4 - потенціометр КВ-1; 5 - секундомір.

Ця посудина вибрана з міркування, що при використанні посудин з вузькою шийкою при проведенні досліджень потрібне переливання рідкого азоту в інші ємності. При переливанні втрачається значна кількість рідкого азоту внаслідок передачі теплоти від навколишнього повітря на нагрів допоміжної посудини і швидке випаровування з неї.

При заморожуванні плодів у парах рідкого азоту об'єкти вкладаються на сітку або вкладаються у спеціальний кошик, який не контактує з рідким азотом.

У цій же посудині доводять до потрібної мінусової температури розсіл або інший рідкий холодоносіє, налитий у відповідну ємність.

Для вимірювання температури у шарах об'єкту досліджень протягом процесу заморожування використовували п'ятиканальний потенціометр КВ-1 (див. рис 2), укомплектований хромель-копелевими термопарами, градуйованими в інтервалі температур  $+50...-50$  °С.

У дослідах по заморожуванню баклажанів у розсолі в якості холодоносія використовувався водяний розчин NaCl. Для складання розчину, який забезпечив би температуру заморожування  $-19$  °С, на один літр води слід додати 210 г повареної солі NaCl.

Потім даний розчин слід ретельно перемішати, і ємність з ним опускали в рідкий азот (посудина Дьюара „Харків-31“). Температуру розсолу фіксували за допомогою потенціометра КВ-1. При досягненні температури розсолу  $-19$  °С ємність із розсолом витягають із посудини Дьюара і поміщають у термос 1 для збереження температури розсолу. Потім у ємність із розсолом занурювався об'єкт досліджень, у який на різній глибині шарово були закладені термопари.

Крім вказаного способу розсіл до потрібної температури охолоджується і у холодильній камері. Ємність із розсолом залишалася у холодильній камері, поки температура розсолу не досягала потрібної температури. Потім у ємність із розсолом опускали плід з термопарами і фіксували зміни температури по шарах через 1 хв. доти, поки температура в центрі плода не стає рівною температурі розсолу.



Дефростація заморожених об'єктів досліджень проводилася у повітряному середовищі, у воді і в розсолі.

При розморожуванні в повітряному середовищі плоди вкладаються у плоску ємність і витримуються до моменту досягнення кімнатної температури у центрі плоду.

При розморожуванні у воді і розсолі заморожений продукт поміщався у воду або розсіл і витримувався до повного вирівнювання температури плоду і середовища.

Для дефростації овочевої продукції контактним методом із застосуванням води в герметично закритій ємності під тиском 0,05 МПа використовується спеціальна камера, фото якої показане на рисунку 3.

Камера складається з пластмасового циліндра 1, нижньої і верхньої кришки 2, золотникового пристрою 3 і манометра 4. Нижня кришка 2 з ущільнювачем герметично притягнута шпильками 7, верхня кришка знімна і притискається герметично до циліндра 2 через ущільнювач пластину 6, притискними гайками 5.

Дефростація під тиском проводиться таким чином: заморожені плоди поміщаються у циліндр 1 і заливаються водою з температурою 25...28 градусів. Потім за допомогою насоса в камері створювався надлишковий тиск, що дорівнює внутрішньому гідростатичному тиску плоду, який підтримували до тих пір, поки температура не досягла 15 °С у центрі плоду. Після цього тиск плавно зменшується, знімається верхня кришка, і плоди витягаються.

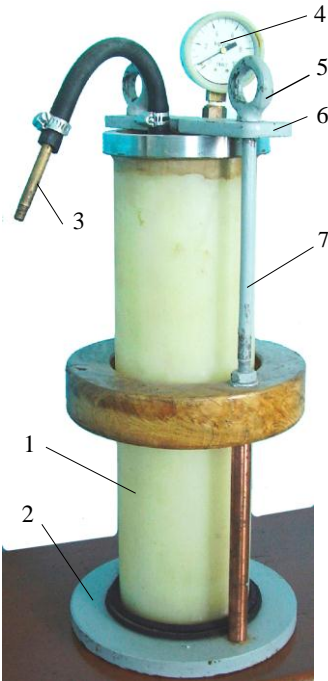


Рисунок 3 – Фото камери для дефростації плодів під тиском:

1 - циліндр; 2 - верхня і нижня кришки; 3 - золотниковий пристрій;  
4 - манометр; 5 - гайки; 6 - притискна пластина; 7 - стяжна шпилька.

## 5 Методика проведення досліджень

1) Підготувати охолоджені до  $+5...+3^{\circ}\text{C}$  плоди до заморожування, для чого оснастити їх термопарами.

Для пошарової фіксації температури в крупні об'єкти досліджень, такі як баклажан, перець, качан кукурудзи, плід гарбуза встановлювалися від чотирьох до п'яти термопар. Ці термопари слід розташовувати або на певній відстані від псевдоцентру плоду, або в найбільш характерних його точках, наприклад, для баклажана (див. рисунок 4, а) рівновіддалені від центру, а для перцю в центрі насінника, повітряній порожнині, м'якоті.

Установку термопар в об'єкт на різну глибину проводити за допомогою пристосування, показано на рисунку 4, б), що складається з голки (2) і цангового затискача (1). Перед проколюванням голка 2 висувалася на необхідну довжину і фіксувалася цанговим затискачем. Потім у ці отвори вставляли термопари і закріплювали їх ізоляційною стрічкою.

Для невеликих об'єктів (ягода винограду, кубик гарбуза) достатня установка однієї, двох термопар. Для винограду термопари встановлюються у ягоди, не відокремлені від грона, в отвір поруч з місцем кріплення їх до плодоніжок.

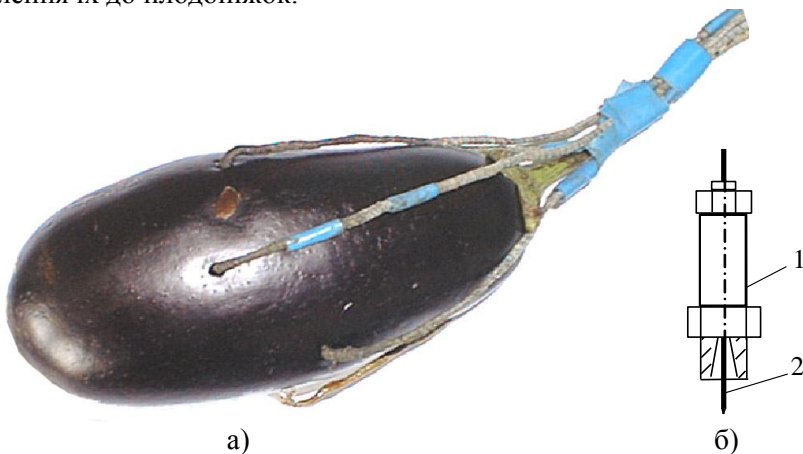


Рисунок 4 – а) Фото баклажана зі встановленими термопарами;  
б) пристосування для проколювання плоду.

2) Провести заморожування об'єкта досліджень з періодичною фіксацією температури в різних його шарах (відповідно до місць встановлення термопар). Рекомендується одну з термопар задіяти для вимірювання температури охолоджуючого середовища.

Фіксацію температури бажано проводити через пропорційні проміжки часу з частотою, яка залежить від габаритів і маси об'єкту та виду заморожування. Наприклад, при заморожуванні плоду баклажана в парах рідкого азоту або в розсолі доцільно фіксувати температуру через 1...3 хв., при заморожуванні того ж об'єкта в холодильній камері – через більші проміжки часу.

3) Провести дефростацію замороженого об'єкта зануренням у воду, з температурою + 20...25 °С. Маса води повинна не менш ніж у 10 разів перевищувати масу плоду. При розморожуванні в повітряному середовищі температура повітря також не повинна перевищувати + 25 °С.

При дефростації фіксувати температуру по шарах продукту.

Дані, одержані при заморожуванні та дефростації, заносити в таблицю за зразком таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати дослідів з заморожування плоду

Час хв.		1	2	3	4	5	6	7	...	130	140	...
Температура °С	I шар											
	II шар											
	III шар											
	IV шар											
	Середовище											

4) Побудувати термограми пошарового процесу (заморожування та дефростації) у координатах час – температура і зробити аналіз за результатами досліджень.

### 6 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“. Особливу увагу слід приділяти проведенню дослідів з застосуванням рідкого азоту і розсолів.

## **7 Контрольні питання**

1 Роль і місце холодильної обробки в загальній класифікації процесів консервування.

2 Переваги і недоліки процесу заморожування продуктів рослинництва.

3 Яку температуру називають кріоскопічною? Її значення для більшості харчових продуктів.

4 Які види охолоджуючих середовищ застосовують у переробній та харчовій промисловості?

5 Які фізико-хімічні змінення відбуваються у харчових продуктах при їх охолодженні?

6 Який процес називають заморожуванням? Як впливає швидкість заморожування на якість продуктів.

7 Формула Р.П. Планка, її характеристика і сфера практичного застосування.

8 Які способи заморожування харчової продукції ви знаєте? Коротка характеристика основних способів.

9 Які фактори найбільше впливають на процес заморожування харчових продуктів?

10 У якому діапазоні негативних значень температури рекомендують зберігати більшість харчових продуктів?

## **9 Тестові завдання**

**1) Яку температуру називають „кріоскопічна“?**

а) температура, при якій у продукті починається виділення твердої фази (кристалів льоду);

б) температура, при якій у продукті закінчується виділення твердої фази (кристалів льоду);

в) температура, при якій у продукті простежується максимальне виділення твердої фази (кристалів льоду).

**2) Укажіть вірний перелік процесів холодильної обробки продуктів харчового виробництва**

- а) охолодження, прохолодження, підморожування, заморожування, холодильне зберігання, теплення, розморожування;
- б) ) охолодження, підморожування, заморожування, холодильне зберігання, теплення, розморожування;
- в) ) охолодження, підморожування, заморожування, переохолодження, холодильне зберігання, теплення, розморожування.

**3) При застосуванні якого охолоджувального середовища можна досягти найбільшу швидкість заморожування?**

- а) повітряного середовища з примусовою циркуляцією;
- б) в рідкому азоті при зануренні продукту в нього;
- в) твердої вуглекислоти при щільному контакті з продуктом.

**4) До якої групи способів заморожування відносять спосіб „криогенного заморожування“?**

- 1) метод прямого контакту харчового продукту із холодоагентом;
- 2) метод використання вторинного середовища (холодоносія);
- 3) метод прямого контакту продукту, що заморожується з холодоагентом через металеву поверхню.

**5) При якому значенні швидкості заморожування у продукті утворюються мінімальні розміри кристалів льоду?**

- а) при максимальному значенні швидкості;
- б) при мінімальному значенні швидкості;
- в) розміри кристалів льоду від швидкості не залежать.

**Література**

1. Байяр Ф. Новое в развитии глобальной холодильной цепи. / Ф. Байяр // Холодильная техника. - 2000. - № 7. - С. 13–16.

2. Биоэнергетические основы холодильной технологии хранения фруктов и овощей / Е. Ф. Балан, И. Г. Чумак, В. Г. Картофяну, Э. Ж. Иукурдзе. - Одесса: Кишинэу, - 2004. – 244 с.

3. Грубы Я. Производство замороженных продуктов / Я. Грубы. – М. : Агропромиздат, 1990. - 336 с.

4 Ялпачик В. Ф. Дослідження дефростації контактним методом під тиском / В. Ф. Ялпачик, Н. П. Загорко, К. М. Стручаев // Праці ТДАТА. - Мелітополь : ТДАТА, 2005. - Вип. 30. - С. 69-73.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛОДІВ І ОВОЧІВ ДО ТА ПІСЛЯ ЗАМОРОЖУВАННЯ

**Мета роботи:** Експериментальним шляхом визначити змінення основних фізико-механічних властивостей плодів і овочів до заморожування та після дефростації.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основні відомості про основні фізико-механічні властивості плодоовочевої продукції, призначеної до заморожування;
- ознайомитись з принципом дії та будовою лабораторного приладу для визначення фізико-механічних властивостей;
- засвоїти методику проведення лабораторної роботи;
- провести досліди по визначенню деформації та зусилля на прокол зразків плодоовочевої продукції;
- обробити результати експерименту і побудувати графічні залежності за результатами дослідів;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- оформити звіт по роботі і захувати його у викладача.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** конспект лекцій за темою заняття та опрацювати рекомендовану літературу;
- **знати:**
  - основні фізико-механічні показники сільськогосподарської плодоовочевої продукції і методи їх визначення;
- **вміти:** проводити налаштування лабораторного приладу, будувати тарувальний графік вимірювальної пружини, користуватись приладом, встановлювати залежності за темою дослідження, аналізувати результати.

### 3 Основні теоретичні положення

Як відомо, фізико-механічні властивості харчових продуктів і сировини для їх виготовлення в значній мірі визначають їх якість, здатність до довгострокового зберігання, транспортування, переробки.

До загального комплексу фізико-механічних властивостей рослинної сировини, призначеної для холодильної обробки, входять такі показники як маса, форма, розміри, щільність, структурно-механічні, оптичні, теплофізичні, сорбційні, електрофізичні та інші властивості.

**Маса, форма, розмір, щільність** є показниками якості багатьох плодів та овочів і кожному помологічному або господарсько-ботанічному сорту відповідають певні форма і розмір. Показники деяких продуктів нормуються стандартами, інші враховуються відповідними нормативами на товарну обробку і зберігання.

**Щільність** – відношення маси до об'єму ( $\text{г/см}^3$ ). Щільність маси залежить від хімічного складу, головним чином, від вмісту вологи, сухих речовин і наявності повітря у тканинах. Чим вищий вміст сухих речовин, тим більша щільність. Наприклад, за щільністю маси бульб визначають вміст крохмалю у картоплі. Більш висока щільність яблук, томатів та інших плодів гарантує більший вихід готового продукту при їх переробці.

До **структурно-механічних властивостей** відносять міцність, твердість, пружність, еластичність, пластичність, релаксацію, липкість харчових продуктів.

**Міцність** – здатність плоду опиратися механічному руйнуванню. Механічна міцність характеризується питомим опором бульб, коренеплодів, плодів вдавненню пуансона площею  $1 \text{ см}^2$  і виражається у  $\text{кг/см}^2$ . Її характеризують також зусиллям на роздавлювання (стискання між двома паралельними площинами).

Як відомо, практично всі тверді харчові продукти відносять до негуківських тіл (тіло Гука є ідеальним і воно відновлює свою вихідну форму після зняття прикладених навантажень, якими б вони не були), тобто, вони мають як пружні, так і пластичні і в'язкі властивості.

Для таких тіл міцність залежить від швидкості деформації. Мінімальну міцність мають тіла при статичному або квазістатичному навантаженні, при якому в'язкопружні напруження повністю релаксують. Руйнування настає тільки при перевищенні границі текучості і розвитку пластичної деформації.

**Твердість** – властивість матеріалу перешкоджати проникненню у нього іншого більш твердого тіла. Твердість плодів і овочів має значення при збиранні, товарній обробці, транспортуванні, зберіганні, визначенні ступеня зрілості.

Твердість не можна виразити як фізичну величину з однозначною розмірністю. Вона є до певної міри технічним параметром, який вимірюється у відносних величинах в залежності від методу визначення.

Плоди і овочі з більш щільними і твердими тканинами протистоять різного роду механічним впливам (порізам, проколам, місцевим забиттям). Такі плоди більш придатні для механізованого збирання, сортування, їх можна упаковувати в тару великої ємності, а при зберіганні навалом насипати більш високим шаром.

Твердість зменшується при дозріванні плодів і деяких овочів, тому вона може служити показником їх зрілості. Однак слід урахувати, що твердість залежить не тільки від ступеня зрілості, але й від інших факторів: сорту, розміру, умов вирощування, хімічного складу. Слід відмітити, що твердість шкірки плоду навіть одного й того ж виду має достатньо велику розбіжність. Наприклад, у яблук на зафарбованій ділянці плоду вона вища, ніж на не зафарбованій; на вершині картоплини – менша, ніж на іншій частині бульби.

**Пружність** – здатність тіл швидко відновлювати первісну форму відразу після зняття зовнішньої сили (натиснення).

**Еластичність** – здатність тіл через певний час відновлювати свою форму після натиснення. Цей показник має значення під час перевезення та зберігання плодів і овочів.

**Пластичність** – здатність продукту незворотно деформуватися під дією зовнішніх сил. Цю здатність рідко проявляють свіжі стиглі плоди і овочі, вона більш характерна для перестиглих, в'ялих або деформованих рослинних об'єктів.



**Релаксація** – властивість продуктів, що характеризує час переходу пружних деформацій у пластичні. Ця властивість ураховується під час перевезення або складування (у велику кількість шарів) плодів і овочів, що знаходяться у нижніх шарах.

**Повзучість** – властивість поступового нарощування пластичної деформації без збільшення навантаження. Ця здатність інколи проявляється для перестиглих, в'ялих або дефростованих рослинних об'єктів.

**Липкість** – здатність продуктів проявляти сили взаємодії з іншим продуктом або тарою. Цей показник характеризує вершкову масло, м'ясний фарш, хлібний м'якуш, кондитерські маси та ін.

Для характеристики структурно-механічних властивостей товарів застосовують термін „консистенція“.

До **оптичних властивостей** відносять прозорість, кольоровість, рефракцію, оптичну активність. Ці показники сприймаються людиною за допомогою зорових відчуттів. Оптичні властивості – важливий показник якості більшості продуктів живлення.

**Теплофізичні властивості** обумовлюють характер і швидкість протікання у продукті процесу нагрівання або охолодження. До цих властивостей відносять теплоємність, теплопровідність, температуру плавлення, затвердіння, замерзання. Теплофізичні характеристики враховуються при варінні, випічці, пастеризації, стерилізації, заморожуванні, розморожуванні, перевезенні і зберіганні продуктів.

**Сорбційні властивості** – здатність речовини поглинати пари води або газу з навколишнього середовища. Процес, зворотний сорбції, називається десорбцією. Ці процеси можуть приводити до змінення якості продукту. Поглинання продуктом парів або газів з утвором хімічних сполук називають хемосорбцією.

**Електрофізичні властивості** визначають поведінку продуктів в електромагнітному полі. Основним показником цих властивостей є електропровідність. На цьому показнику засноване визначення вологості і титрованої кислотності деяких продуктів.

У даній лабораторній роботі будуть досліджені такі основні показники як міцність, твердість і релаксаційна спроможність плодів і овочів до заморожування і після їх дефростації.

#### 4 Оснащення лабораторної роботи механізмами і приладами

Змінення фізико-механічних властивостей плодів до і після заморожування визначаємо за деформацією плоду і зусиллю на прокол.

Зусилля, при якому відбуваються допустимі деформації, визначаємо на лабораторній установці, розробленій на базі приладу для визначення жорсткості витих пружин. Установка (рисунок 1) складається з основи 1, на якій жорстко закріплена стійка 2. Уповдовж стійки вільно переміщається стіл 3 з вимірюваним плодом 4.

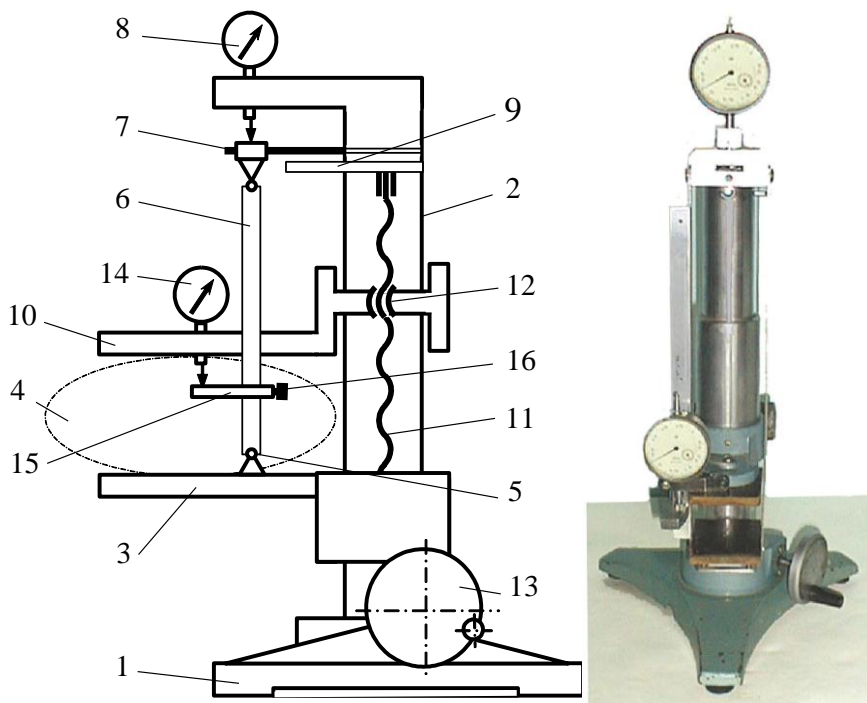


Рисунок 1 – Установка для визначення зусиль деформації

1 - основа; 2 - стійка; 3 - стіл; 4 - плід; 5 - шарнірне зчленування; 6 - тяга; 7 - силова пружина; 8 - індикатор; 9 - упор; 10- траверса; 11 - гвинт; 12 - гайка; 13 - маховичок; 14 - індикатор; 15 - упор; 16 - гвинт.

Через шарнірні зчленування 5 за допомогою тяги 6 стіл підвішений на пружині 7 пристрою для вимірювання сили.

Зусилля розраховувалося залежно від її деформації, що фіксується за показами індикаторної головки годинникового типу 8. Для різних діапазонів вимірювань передбачені змінні пружини різної жорсткості. Перед проведенням дослідів пружина тарувалася.

Для оберігання пружини від надмірної деформації призначений упор 9, обмежуючий її хід. Траверса 10 поступально переміщається уподовж стійки за допомогою гвинта 11 і закріпленої на ній гайки 12.

Обертальний рух на гвинт передається від маховичка 13 через черв'ячну пару.

Досліди за визначенням зусилля, при якому відбуваються допустимі деформації, необхідно проводити таким чином. Обертаючи маховик 13, ступінчасто навантажувати плід послідовними зусиллями, що збільшуються, і фіксувати за показами індикатора 8.

Деформація плоду вимірюється за показами індикатора 14, закріпленого на траверсі. Індикатор упирається своєю ніжкою в упор 15, який можна пересувати уздовж однієї з тяг і закріплювати на ній фіксувальним гвинтом 16.

При визначенні зусилля на проколювання плоду на траверсі 10 встановлювалася змінна голка відповідного діаметра, а пружина 7 замінювалася на пружину меншої жорсткості.

## **5 Методика проведення експерименту**

1) У якості об'єктів для визначення міцності, твердості і показника релаксації доцільно використовувати плоди баклажанів, перцю солодкого, кабачків, тощо. Випробовують свіжі плоди та плоди дефростовані після заморожування (як варіанти можна проводити порівняльні досліди для плодів заморожених і дефростованих різними способами). Для досліджень слід вибрати зразки, близькі один до одного за формою, масою, розмірами.

2) Провести тарування робочої пружини установки шляхом ступінчастого навантаження стола 3 тарувальними важками (гирями). Побудувати тарувальний графік у координатах навантаження - показання індикатора 8, або скласти тарувальну таблицю.

3) Для визначення зусилля на прокол на кронштейні траверси 10 установити голку діаметром 2...3 мм (у залежності від консистенції об'єкта вимірювання) з кутом загострення 60 °. Укласти плід на столик 3 приладу і за допомогою маховичка 13 опускати голку і проколювати об'єкт досліджень на установлену за індикатором 14 глибину. За індикатором 8 визначається зусилля проколювання. Одержані при десятикратному повторі дані занести в таблицю 1.

4) Визначення залежності деформації плоду від його навантаження проводити при навантаженні його між двома паралельними пластинами – столом 3 (див. рисунок 1) і траверсою 10. Для цього плід встановити на стіл 3 і, підводячи траверсу до нього, навантажити його стисненням. Деформацію і зусилля стиснення баклажан фіксувати за допомогою індикаторів 14 і 8.

Ступінчасте пропорційне навантаження проводити з інтервалом в 5...20 Н (в залежності від величини і консистенції плоду). Граничне максимальне навантаження обмежувати при досягненні незворотної втрати форми об'єкта дослідження або ознак початку його руйнування. Зусилля деформації за індикатором 8 фіксувати у момент вантаження, і після витримки 1 хв.

Дані дослідів занести в таблицю довільної форми.

5) Для вивчення явища релаксації найбільш доцільно використовувати плід баклажана, який має достатньо прийнятну консистенцію, міцність та пружність.

При проведенні даного дослідження плід потрібно послідовно навантажувати зусиллями 50, 100 і 150 Н та протягом 10 хвилин з інтервалом в одну хвилину знімати покази індикатора зусиль і індикатора деформації плоду.

6) Для вивчення впливу заморожування і послідувочої дефростації на наведені властивості плодів та овочів провести порівняльні дослідження з повторенням пунктів 3)...5) даної методики відносно дефростованих плодів.

## 6 Обробка результатів експериментів

1) Зусилля на прокол

Твердість (зусилля на прокол) плодів і овочів, МПа визначається за наступною формулою:

$$Z_n = \frac{4 \cdot F_n}{\pi \cdot d_z^2}, \quad (1)$$

де  $F_n$  - зусилля на прокол, Н;

$d_z$  - діаметр голки приладу, мм.

Таблиця 1 – Математична обробка результатів дослідів по визначенню твердості плодів і овочів

Дослід	Показання індикатора, мм	Твердість, МПа	$Z_{ni} - \bar{Z}_n$	$(Z_{ni} - \bar{Z}_n)^2$
1	$\Delta_1$	$Z_{n1}$		
2	$\Delta_2$	$Z_{n2}$		
3	$\Delta_3$	$Z_{n3}$		
...	...	...	...	...
9	$\Delta_9$	$Z_{n9}$		
10	$\Delta_{10}$	$Z_{n10}$		
Середнє значення	$\bar{\Delta}$	$\bar{Z}_n$	-	$\frac{10}{I} \sum (Z_{ni} - \bar{Z}_n)^2$

Середнє квадратичне вибіркоче відхилення середнього значення твердості визначається за виразом:

$$S_{\bar{Z}_n} = \sqrt{\frac{\sum (Z_{ni} - \bar{Z}_n)^2}{N(N-1)}}, \quad (2)$$

Вірогідне значення твердості об'єкту, що вимірювався, буде знаходитися в інтервалі

$$Z_n = \bar{Z}_n \pm S_{\bar{Z}_n}. \quad (3)$$

2) За результатами визначення залежності деформації плоду від його навантаження побудувати графік залежності деформації плоду від зусилля його навантаження.

3) За результатами визначення показників релаксації побудувати графіки залежності сили навантаження і деформації від часу витримки під навантаженням (див. рисунок 2).

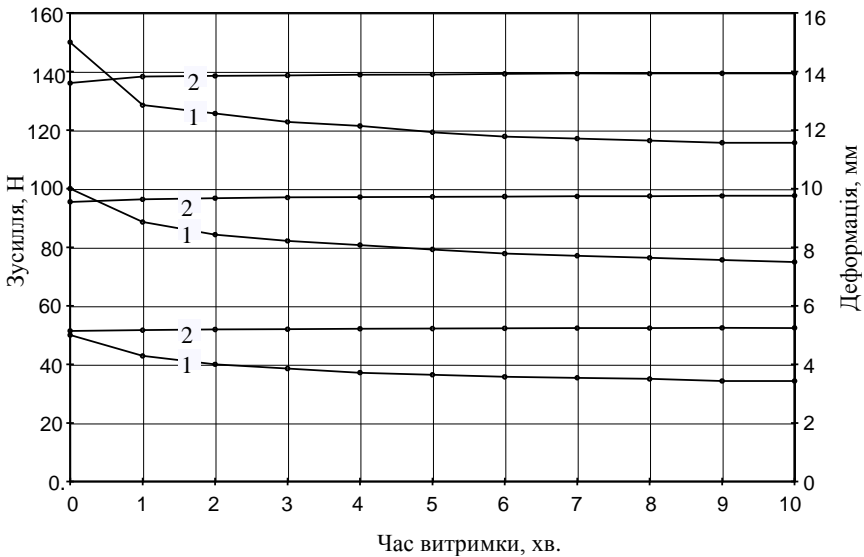


Рисунок 2 – Приклад оформлення графіка показника релаксації свіжого плоду баклажана

## 7 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## 8 Контрольні питання

- 1 Перелічіть основні фізико-механічні показники плодів і овочів.
- 2 Дайте характеристику показникам *маса, форма, розмір, щільність*.
- 3 Дайте формулювання властивості „міцність“. Якими способами визначаються показники міцності?
- 4 Показник плодів і овочів „твердість“. З якою метою визначають цей показник?
- 5 Поясніть поняття пружність, еластичність, пластичність, релаксація. Яким чином можна оцінювати ці показники?

## 9 Тестові завдання

1) Який з наведених показників не відноситься до *структурно-механічних властивостей*?

- а) пружність;                      б) маса;                      в) твердість.

2) Яке з наведених формулювань вірно описує показник „твердість плоду“?

- а) здатність плоду опиратися механічному руйнуванню;  
б) властивість матеріалу перешкоджати проникненню у нього іншого більш твердого тіла;  
в) властивість продуктів, що характеризує час переходу пружних деформацій у пластичні.

3) Яке з наведених формулювань вірно описує показник „пружність плоду“?

- а) здатність тіл швидко відновлювати первісну форму відразу після зняття зовнішньої сили (натиснення).  
б) здатність тіл через певний час відновлювати свою форму після натиснення;  
в) властивість продуктів, що характеризує час переходу пружних деформацій у пластичні.

4) Як називають властивість поступового нарощування пластичної деформації без збільшення навантаження?

- а) пластичність;                      б) еластичність;                      в) повзучість

5) Вкажіть розмірність показника „твердість плоду“.

- а) кг/м<sup>3</sup>;                      б) Па;                      в) м/с<sup>2</sup>.

## Література

1. Ханин В.П. Исследование физико-механических свойств пищевых продуктов. / В.П. Ханин, В.П. Попов, С.В. Антимонов, М.Ю. Шрейдер. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 40 с.

2. Кузнецов О.А. Реология пищевых масс: учебное пособие. / О.А. Кузнецов, Е.В. Волошин, Р.Ф. Сагитов. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИРОБНИЦТВА ЛЬОДУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛЬОДОГЕНЕРАТОРА

**Мета роботи:** 1) експериментальним шляхом установити продуктивність льодогенератора ЛТ-50, розрахункове теплове навантаження на холодильну установку, термін заморозки та швидкість процесу.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути принцип дії та будову льодогенератора ЛТ-50;
- розрахувати основні параметри процесу виробництва льоду;
- провести експериментальні дослідження виробництва льоду;
- обробити результати проведеного експерименту;
- побудувати графік залежності за результатами дослідів;
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

**- повторити:**

- а) існуючі способи охолодження продукції сільського господарства;
- б) термодинамічні процеси в холодильних апаратах;
- в) загальні питання процесу затвердіння та плавлення;
- г) теоретичні основи процесу охолодження льодом;

**- знати:**

- а) область використання льоду в охолодженні харчової продукції;
- б) класифікацію льодогенераторів;
- в) конструктивні особливості холодильних машин;

**- вміти:** проводити налаштування льодогенератора ЛТ-50 за умовами проведення дослідів, користуватися контрольно-вимірювальними приладами, проводити визначення основних аналітичних залежностей за темою лабораторного дослідження, будувати графіки відповідних залежностей за результатами досліджень.



### 3 Загальні відомості

У природі та техніці часто відбуваються процеси переходу речовин з рідкого стану в твердий або з твердого в рідкий.

**Затвердінням** називається процес переходу речовини з рідкого стану в твердий, що йде з виділенням теплоти фазового переходу. Якщо тверда фаза, що утворилася при цьому, має кристалічну структуру, то процес називають **кристалізацією**.

Перехід речовини з твердого стану в рідкий, що відбувається з поглинанням теплоти фазового переходу, називається **плавленням**. Часто процес затвердіння (кристалізації) чистої води або води, що міститься у вологих матеріалах, називають **заморожуванням**, а плавлення – **відтаванням**.

Процеси затвердіння і плавлення знаходять широке застосування у хімічній і харчовій технологіях, ливарній справі, будівельній техніці і т.п.

Виробництво харчового водного льоду, опріснення морської води і концентрування соків заморожуванням, заморожування та відтавання харчових продуктів, підморожування ґрунтів для підвищення їх несучої здатності або відтавання вічної мерзлоти, застосування поперемінного плавлення і затвердіння для акумуляції холоду або підтримання постійної температури в термостатах – далеко не повний перелік виробничих процесів, фізичним змістом яких є затвердіння та плавлення.

Льодогенератори призначені для отримання харчового льоду або заморожених напоїв у вигляді гранул. Для отримання холоду в льодогенераторах використовують холодильні машини, в яких застосовують зворотний круговий термодинамічний цикл, який складається з процесів стиснення газу, конденсації і випаровування.

Згідно з другим законом термодинаміки охолодження до температур, нижчих за температуру навколишнього середовища, пов'язане з перенесенням теплоти з нижчого температурного рівня на вищий, можливе тільки при витраті енергії. Таке перенесення теплоти здійснюється за зворотним циклом Карно.

Енергетичний баланс прямого циклу Карно виражається рівнянням:

$$Q = L + Q_0, \quad (1)$$

Згідно з ним при переході теплоти від більш високого температурного рівня  $T$  на більш низький температурний рівень  $T_0$  здійснюється робота  $L$  і на низькому температурному рівні зберігається теплота  $Q_0$ . Цикл Карно наведений на графіках рисунка 1.

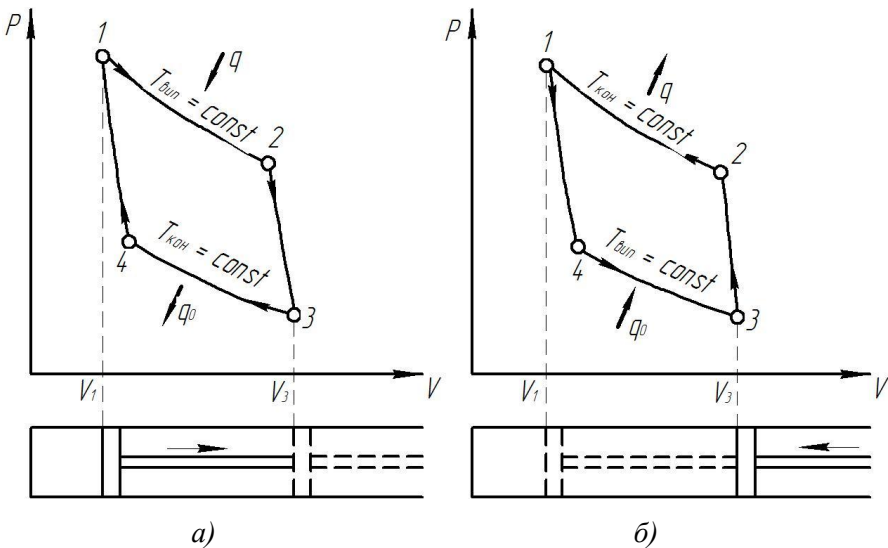


Рисунок 1 – Цикл Карно

Робоче тіло (рисунок 1а) при підведенні до нього теплоти  $q$  розширюється по ізотермі 1-2, здійснюючи корисну роботу  $l$  при максимально можливому ККД.

Подальше розширення робочого тіла відбувається за рахунок внутрішньої енергії по адіабаті 2-3. Збільшення об'єму робочого тіла викликає переміщення поршня зліва направо.

Потім від робочого тіла відводиться теплота  $q_0$ , що веде до зменшення об'єму в ізотермічному процесі 3-4.

Далі тіло стискається в адіабатичному процесі 4-1. Зменшення об'єму робочого тіла викликає переміщення поршня справа наліво.

Корисна питома робота, яка отримана в циклі в результаті витрати теплоти  $q$ , буде пропорційна площі криволінійного чотирикутника 1-2-3-4 та дорівнює:

$$l = q - q_o \quad (2)$$

Якщо теплоту  $q_o$  підводить в ізотермічному процесі випаровування робочого тіла 4-3 (рисунок 1 б), а теплоту  $q$  відводить в ізотермічному процесі конденсації 2-1, здійсниться зворотний цикл Карно.

Холодильну машину можна розглядати як такий тепловий насос, що перекачує теплоту від джерела з низькою температурою до джерела з більш високою температурою.

На відміну від *прямого циклу* Карно, де була здійснена робота  $l$  за рахунок підведення теплоти  $q$ , у *зворотному циклі* все відбувається навпаки. Теплота  $q$  відводиться, якщо на це витрачається робота  $l$  в процесах стиснення 3-2 і 2-1:

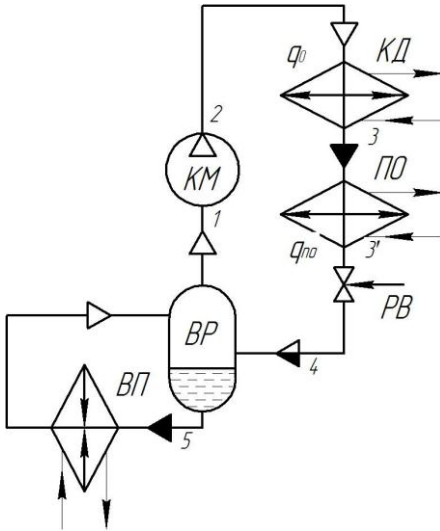
$$q = q_o + l, \quad (3)$$

де  $q_o$  - питома холодопродуктивність (кількість теплоти, що відбирається від охолоджуваного середовища 1 кг робочого тіла), Дж/кг.

Будь-яка парова холодильна машина повинна мати чотири основні частини: *випарник*, що відбирає теплоту з охолоджуваного приміщення; *конденсатор*, який віддає теплоту в навколишнє середовище; *компресор*, що засмоктує пари холодоагенту і стискає їх; *регулюючий вентиль*, який забезпечує підтримку різниці тиску в конденсаторі і випарнику.

Принципова схема і теоретичний цикл одноступінчастої парової холодильної машини в діаграмах  $s-T$  і  $lgP-i$  наведені на рисунках 2 і 3.

На принциповій схемі машини (рисунок 2) цифрами 1, 2, 3, 3' , 4 і 5 відзначені стани холодильного агента, які відповідають точкам теоретичного циклу, побудованого в діаграмах, а літерами – умовні позначення обладнання, яке входить до складу машини.



і 5 відзначені стани холодильного агента, які відповідають точкам теоретичного циклу, побудованого в діаграмах, а літерами – умовні позначення обладнання, яке входить до складу машини.

- BP* - відокремлювач рідини;
- KM* - компресор;
- КД* - конденсатор;
- ПО* - переохолоджувач;
- PВ* - регулюючий вентиль.

Рисунок 2 – Принципова схема одноступінчастої холодильної машини, що працює за теоретичним циклом

Для побудови циклу в діаграмі  $s-T$  або  $lgP-i$  необхідно знати температури в його характерних точках: кипіння  $t_o$ , конденсації  $t_k$  і перед регулюючим вентилем  $t_{p.в.}$ .

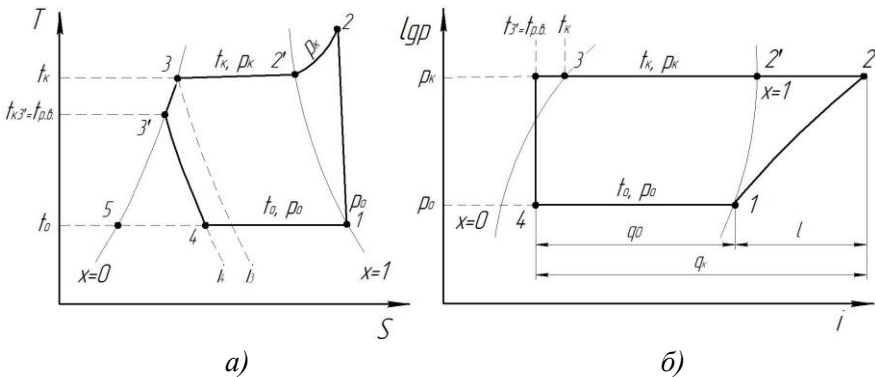


Рисунок 3 – Теоретичні цикли одноступінчастої холодильної машини:

а) в діаграмі  $s - T$ ; б) в діаграмі  $lgP - i$ .

#### **4 Оснащення робочого місця лабораторної роботи**

- 1 Льодогенератор ЛТ-50;
- 2 Прилад для вимірювання температури з термопарами;
- 3 Ваги, штангенциркуль.

Лабораторна установка складається з власне льодогенератора, систем подачі водопровідної води і відведення її у каналізацію.

Льодогенератор торговий марки ЛТ-50 являє собою автоматичний пристрій, призначений для отримання харчового льоду однакової форми.

Конструкція льодогенератора (рисунок 4) включає кілька взаємопов'язаних вузлів, що забезпечують його функціональне призначення.

Корпус складається з прямокутного металевого піддона 1 з регульованими по висоті ніжками 2. До піддону кріпляться дві зовнішні боковини 3 з технологічними люками 8, на яких кріпиться задня стінка 4. Зверху встановлена теплоізольована кришка 5.

З передньої сторони розташовані теплоізольована кришка 6 бункера для зберігання льоду і легкознімна решітка 7, яка має жалюзі. В середині корпусу, в нижній його частині, знаходиться машинне відділення, у якому розташовуються: холодильний агрегат 9, прикріплений до піддону, і пульт управління.

Зверху, над машинним відділенням, знаходиться льодоприготувальне відділення, яке складається з теплоізольованого бункера 10 для зберігання льоду, що представляє собою прямокутний короб, зварений із нержавіючої сталі.

У верхній частині бункера встановлений датчик терморегулятора заповнення бункера льодом.

Над бункером розташована ванна 11 для запасу питної води, що йде на приготування льоду. У лівій частині ванни встановлений електронасос 12, усмоктувальний патрубок якого знаходиться у ванні з водою.

Над дном ванни по її поздовжній осі встановлений зрошувач, що представляє собою профільовану трубку з прорізами (форсунками) для створення фонтанів води; зрошувач з'єднаний з нагнітальним патрубком електронасоса гумовою трубкою. Для запобігання попадання струменів води від зрошувача у ванну збору льоду встановлена захисна шторка 13.

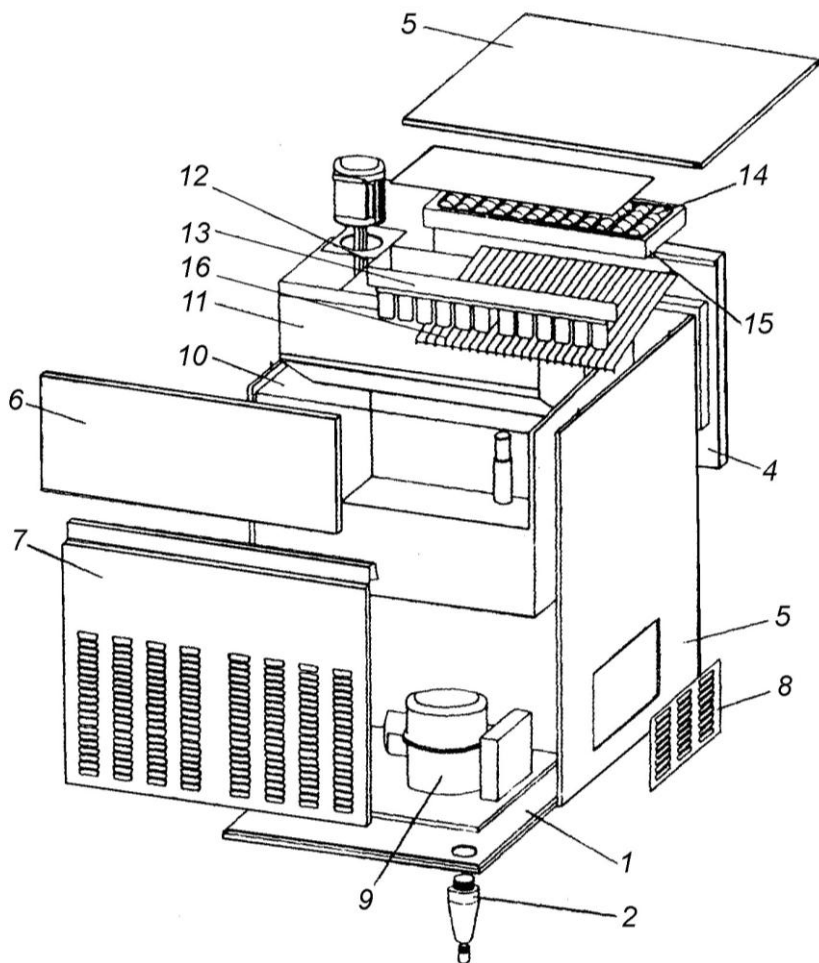


Рисунок 4 – Конструкція льодогенератора ЛТ-50

1 - піддон; 2 - ніжки; 3 - боковини; 4 - стінка задня; 5, 6 - кришка; 7 - решітка; 8 - люк; 9 - холодильний агрегат; 10 - бункер; 11, 15 - ванна; 12 - електронасос; 13 - шторка; 14 - випарник; 16 - приймальна решітка.

Над зрошувачем встановлений випарник *14*, який складається з полімерної пластини прямокутної форми, з одного боку якої знаходяться щільно вставлені в неї робочі органи випарника – порожнисті мідні пальці, звернені до зрошувача, а з іншого, зверху, знаходяться хладонові комунікації,

що з'єднують торці цих пальців так, що холодоагент, циркулюючи в системі, послідовно проходить через усі 56 пальців. В середині пальців встановлена вертикальна перегородка з забезпеченням проходу холодоагенту.

Верхня частина випарника з чотирьох боків оточена бортиками, які утворюють ванну з підігрітою водою для нагріву пальців, у результаті чого відбувається відтавання льоду. У протилежному місці від подачі підігрітої води знаходиться отвір для зливу води, що остигнула, у ванну. Під випарником встановлена приймальна решітка 16.

На вході води в льодогенератор встановлений фільтр тонкого очищення води і водяний редуктор з манометром для регулювання тиску водопровідної води, яка подається.

Функціональна схема льодогенератора приведена на рисунку 5.

Льодогенератор працює наступним чином. Натисканням на кнопку „Робота“, розташовану на пульті управління, одночасно вмикається компресор 1 холодильного агрегату і водяний електронасос 3, в результаті чого у випарник 9 починає надходити холодоагент, а вода з труби 2 і форсунок зрошувача 12 починає омивати робочі поверхні пальців випарника.

У процесі роботи холодильного агрегату гарячі пари холодоагенту нагрівають у спеціальному теплообміннику 15 питну воду, що надходить з водопроводу.

Термодатчик 6 пульта управління контролює в процесі наморозування льоду температуру у випарнику в точці Б. При досягненні заданої температури (від мінус 6 до мінус 12° С) вмикається реле часу, розташоване в пульті управління, яке через 13 хвилин вимикає холодильний агрегат і водяний насос і вмикає соленоїдний клапан 1.

Клапан відкривається, і підігріта в теплообміннику вода по трубці витискується новою порцією холодної води, що надходить під тиском з водопроводу у ванну випарника 7, де нагріває виступаючі торці пальців і за рахунок високої теплопровідності міді відбувається нагрів тіла пальців і відтавання намороженого льоду на кожному з пальців.

Шматки льоду, які зійшли з пальців, падають на похилу решітку і зісковзують у бункер 14 для збору і подальшого зберігання льоду.

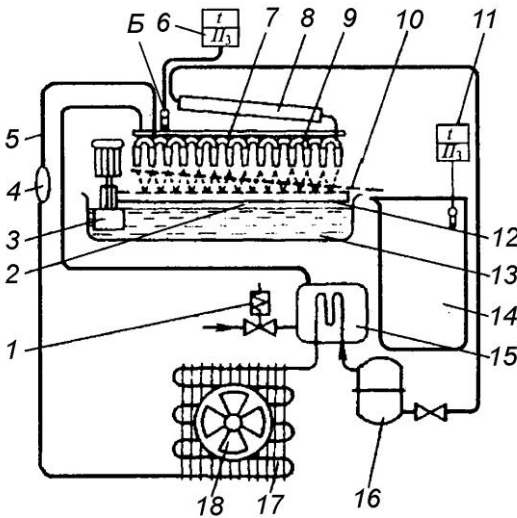


Рисунок 5 – Принципова схема льодогенератора

1 - соленоїдний вентиль; 2 - зрошувальна трубка; 3 - насос; 4 - фільтр-осушувач; 5 - капілярна трубка; 6 - реле температури; 7 - ванна випарника; 8 - відокремлювач; 9 - випарник; 10 - похила решітка; 11 - реле температури; 12 - форсунки; 13 - ванна з водою; 14 - бункер; 15 - теплообмінник; 16 - компресор; 17 - конденсатор; 18 – вентилятор.

Після двохвилинного відтавання за командою пульта управління соленоїдний клапан закривається і знову автоматично вмикаються холодильний агрегат і водяний електронасос. Починається новий цикл роботи.

Наповнення бункера льодом відбувається до тих пір, поки не відбудеться контакт льоду з чутливою частиною датчика-терморегулятора заповнення бункера. При зануренні чутливої частини датчика в лід льодогенератор автоматично вимикається, а при витрачанні частини льоду і звільненні від нього датчика терморегулятора льодогенератор знову автоматично вмикається.

Вода з ванни 7 стікає через дренажний калібрований отвір у ванну 13 з водою і використовується для поповнення витрат води, потрібної на утворення льоду.

У вихідному положенні у ванну заливається близько 11,5 літрів питної води. Для запобігання переповнення ванни в ній встановлюється переливний патрубок.



Холодильна система льодогенератора забезпечує отримання необхідної кількості холоду при циркуляції у системі холодоагенту (хладон 12). У вихідному положенні, при відкритих всмоктувальних і нагнітальних штуцерах, система заповнюється парами і рідким холодоагентом. При вмиканні компресора 16 відбувається усмоктування і стиснення парів і виштовхування їх у нагнітальну магістраль.



Рисунок 6 – Фото льодогенератора ЛТ-50:

а) робочий відсік; б) машинне відділення.

Нагріті від стиснення пари потрапляють у теплообмінник 15, де, пройшовши по змійовику, віддають частину свого тепла навколишній воді. У результаті цього температура парів знижується, а температура води підвищується (у подальшому ця вода використовується для відтавання готово-

го наморозеного льоду), потім пари надходять у конденсатор 17, де відбувається подальше охолодження парів до перетворення їх у рідкий стан.

Рідкий холодоагент надходить у капілярну трубку 5, яка виконує роль дроселюючого пристрою, і, пройшовши її, потрапляє у розширювальну частину випарника 9, де кипить, проходячи послідовно по порожнистих пальцях, омиваних зовні водою.

Пройшовши випарник, холодоагент докипає у вторинному випарнику і, повністю перейшовши в пароподібний стан, по всмоктувальній трубці потрапляє у компресор, і цикл знову повторюється.

Під час роботи холодильної машини гаряча пара холодоагенту, стиснена компресором, підігріває воду в теплообміннику. Рідкий холодоагент відділяється у відокремлювачі 8.

## 5 Методика проведення роботи

1) Перевірити візуально комплектність льодогенератора.

2) Зняти верхню кришку 5 (див. рисунок 4). Визначити розміри ванни: довжину  $l$  (м), ширину  $b$  (м), висоту  $h$  (м). Підрахувати кількість пальців випарника  $n$ , визначити їх діаметр  $d$  (м). Результати внести в таблицю 1.1.

3) Прикріпити термопари приладу для вимірювання температури (потенціометра) до поверхонь теплообмінних апаратів льодогенератора: першу – до трубопроводу підведення парів фреону до компресора, другу – до трубопроводу відведення стиснених парів фреону від компресора, третю – до поверхні компресора, четверту – на трубопроводі перед теплорегулюючим вентиляем, п'яту – після терморегулюючого вентиля, шосту – у ванні.

4) Відкрити вентиль подачі води з водопроводу. Увімкнути потенціометр і льодогенератор.

5) Відкрити кришку льодогенератора і штангенциркулем вимірити зовнішній діаметр гранули льоду  $d_2$  (м). Закрити кришку.

6) Помістити в піддон усі гранули льоду, отримані за робочий цикл, і визначити їх масу  $G_2$  (кг).

7) Визначити протягом циклу температуру на поверхнях теплообмінних апаратів холодильного агрегату, початкову температуру во-

ди  $t_e$  (°C) і кінцеву середню температуру гранули льоду  $t_2$  (°C). Заміри зробити протягом 2-3 циклів. Результати внести в таблицю 1.2.

8) Вимкнути льодогенератор і потенціометр, від'єднати штепсельний роз'єм електроживлення, закрити вентиль подачі води. Ретельно прибрати робоче місце.

### 6 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

### 7 Обробка результатів експерименту

Таблиця 1.1 – Протокол вимірювань установки

Довжина ванни, м	$l$	
Ширина ванни, м	$b$	
Висота ванни, м	$h$	
Кількість пальців	$n$	
Середній діаметр пальців, м	$d$	
Висота пальця, м	$h_n$	

Таблиця 1.2 – Протокол випробувань льодогенератора

Час наморозування гранул, с	$\tau_n$	
Час відтавання гранул, с	$\tau_o$	
Час повного циклу, с	$T$	
Зовнішній діаметр гранули, м	$d_2$	
Маса гранул льоду, отриманих за цикл, кг	$G_1$	
	$G_2$	
Значення температури, °C:		
- випару фреону	$t_o$	
- перед усмоктувальним вентилем	$t_1$	
- після компресора	$t_2$	
- конденсації	$t_k$	
- перед терморегулюючим вентилем	$t_{p.6}$	
- нагріву випарника при відтаванні гранул	$t_{om}$	
- води початкова	$t_8$	
- гранул середня	$t_2$	

Середня маса гранул льоду, отриманих за один цикл, кг:

$$G_2 = \frac{G_{21} + G_{22} + G_{23}}{3}, \quad (4)$$

де  $G_{21}$ ,  $G_{22}$ ,  $G_{23}$  - маси гранул льоду, одержаних за цикли, кг.

Фактична продуктивність льодогенератора, кг/год.:

$$П = \frac{3600 \cdot G_2}{T} \quad (5)$$

Теплове навантаження  $Q$  на холодильну установку, кВт:

$$Q = Q_6 + Q_m + Q_o, \quad (6)$$

де  $Q_6$  - теплоприток від води при її охолодженні, заморожуванні і охолодженні гранул льоду до кінцевої температури, кВт;

$Q_m$  - теплоприток від металоконструкцій, оплуканих при відтаванні льоду і охолоджуваних при заморожуванні, кВт;

$Q_o$  - теплоприток від навколишнього середовища через огорожувальні конструкції льодогенератора, кВт.

Теплоприток від води

$$Q_6 = \frac{G_n (c_6 \cdot t_6 + r - c_n \cdot t_2)}{\tau_n}, \quad (7)$$

де  $c_6$  - питома теплоємність води, ( $c_6 = 4,186$  кДж/(кг·К));

$r$  - питома теплота фазового переходу, ( $r = 335,2$  кДж / кг);

$c_n$  - питома теплоємність льоду, ( $c_n = 2,1$  кДж / (кг · К));

$t_2$  - середня температура гранул льоду, °С.

Маса льоду  $G_n$ , одержаного за цикл роботи льодогенератора:

$$G_n = G_2 (1 + y), \quad (8)$$

де  $y$  - масова частка льоду, яка відтала при звільненні пальців:

$$y = \frac{(d + 2\delta)^2 - d^2}{d_2^2 - d^2}, \quad (9)$$

де  $\delta$  - товщина підталого шару льоду, м ( $\delta = 1 \cdot 10^{-3}$  м);

$d_2$  - зовнішній діаметр гранул льоду, м.

Теплоприток від металокопструкцій

$$Q_M = \frac{G_M - c_M(t_{om} - |t_o|)}{\tau_M}, \quad (10)$$

де  $G_M$  - маса металокопструкцій, які отеплюються при відтаванні льоду і охолоджуваних при заморожуванні, кг ( $G_M = 0,6$  кг);

$c_M$  - питома теплоємність матеріалу випарника, кДж/(кг·К)  
( $c_M = 0,682$  кДж / (кг·К));

$t_{om}$  - температура нагріву випарника при розморожуванні, °С.

Теплоприток від навколишнього середовища

$$Q_o = 0,15Q_e \quad (11)$$

За відомими значеннями температур  $t_k$ ,  $t_{p.e.}$ ,  $t_o$ ,  $t_1$  побудуйте цикл роботи холодильної установки на  $lgP-i$  діаграмі. Визначте тепловміст (кДж/кг) холодильного агента в характерних точках  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_4$  і розрахуйте основні параметри циклу.

Питома холодильна потужність  $q_o$ , кДж/кг:

$$q_o = i_1 - i_4 \quad (12)$$

Питома робота компресора  $A_o$ , кДж/кг:

$$A_o = i_2 - i_1 \quad (13)$$

Питома теплота конденсації  $q_k$ , кДж/кг:

$$q_k = i_2 - i_3 \quad (14)$$

Холодильний коефіцієнт  $\varepsilon$

$$\varepsilon = q_o / A_o \quad (15)$$

Маса холодильного агента, що циркулює у системі,  $G$ , кг/с:

$$G = \frac{1,03 \cdot Q}{q_o} \quad (16)$$

Теоретична потужність компресора  $P_T$ , кВт:

$$P_T = GA_o \quad (17)$$

Розрахункова потужність компресора  $P_e$ , кВт:

$$P_e = \frac{P_T}{\eta_i \cdot \eta_m}, \quad (18)$$

де  $\eta_i$  - індикаторний коефіцієнт ( $\eta_i = 0,87$ );

$\eta_m$  - механічний ККД ( $\eta_m = 0,9$ ).

Порівняти розрахункову і фактичну потужності компресора, у разі розбіжності зробити висновки.

### **8 Контрольні питання**

1. Які типи льодогенераторів ви знаєте, їх конструктивні особливості, принцип дії?

2. З яких основних елементів складається холодильна система льодогенератора? Поясніть її роботу.

3. Яка особливість термодинамічних циклів, які здійснюються у холодильних машинах?

4. Поясніть роль регулюючого вентиля у холодильній системі.

5. Поясніть порядок побудови теоретичних циклів холодильних машин.

### **9 Тестові завдання**

**1 Процес переходу речовини з рідкого стану в твердий, що йде з виділенням теплоти фазового переходу, називається**

а) охолодження;

б) відтавання;

в) дефростація;

г) затвердіння.

**2 Перехід речовини з твердого стану в рідкий, що відбувається з поглинанням теплоти фазового переходу, називається**

а) плавлення;

б) кристалізація;

в) сублімація;

г) заморожування.

**3 Процес переходу речовини з рідкого стану в твердий з утворенням при цьому твердої фази у вигляді кристалічної структури це**

а) плавлення;

б) сублімація;

в) кристалізація;

г) дефростація.

**4 Холодильні машини працюють за термодинамічним:**

- а) зворотним циклом;                      б) циклом Карно;  
в) прямим циклом;                      г) циклом Ренкіна.

**5 Парова холодильна машина обов'язково повинна мати чотири основні частини:**

- а) випарник, електронасос, конденсатор, реле;  
б) компресор, вентилятор, випарник, парогенератор;  
в) конденсатор, теплообмінник, електродвигун, насос;  
г) випарник, конденсатор, компресор, регулюючий вентиль.

**6 У формулі енергетичного балансу прямого циклу Карно, який виражається рівнянням  $Q=L+Q_0$ , літерою „L“ позначається:**

- а) теплота;                      б) холодопродуктивність;  
в) робота;                      г) температура.

**7 При якій холодильній обробці температура продукту на 2...3 ° С нижча за точку замерзання?**

- а) підморожування;                      б) заморожування;  
в) холодильне зберігання;                      г) відморожування.

**8 До якого типу охолоджуючого середовища відноситься фреон-11?**

- а) рідкого;    б) газоподібного;    в) твердого;    г) змішаного.

**9 Який холодильний агент є найбільш небезпечним?**

- а) аміак;    б) вуглекислий газ;    в) фреон-22;    г) гелій-3.

**10 Скільки пальців знаходиться у робочому відділенні льодогенератора ЛТ-50?**

- а) 15 шт.                      б) 30 шт.                      в) 40 шт.                      г) 56 шт.

**Література**

1. Большаков С.А. Холодильная техника и технология продуктов питания. / С.А. Большаков. - М.: Изд. центр „Академия“, 2003. - 304 с.

2. Воробьева Н.Н. Холодильная техника и технология : учебное пособие. В 2-х частях. Ч. 2 / Воробьева Н.Н.; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. - Кемерово, 2006. - 104 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ПОНЧИКІВ НА АПАРАТІ АП-3М

**Мета роботи:** Визначити основні параметри робочої камери і нагрівальних елементів апарата для виробництва пончиків, дослідити температурні режими процесу обсмажування. Провести тепловий розрахунок апарата.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути загальні відомості з виробництва смажених борошняних виробів, зокрема пончиків;
- ознайомитись з принципом дії та будовою апарата для виробництва пончиків марки АП-3М;
- провести аналітичні визначення параметрів теплового режиму нагрівачів автомата;
- провести експериментальні дослідження з визначення параметрів теплового режиму нагрівачів апарата;
- обробити результати експерименту;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- оформити звіт по роботі і відзвітуватися перед викладачем.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** конспект лекцій за темою заняття та опрацювати рекомендовану літературу;
- **знати:**
  - принципи дії, будову та область використання обладнання з виготовлення смажених борошняних виробів;
- **вміти:** проводити налаштування автомата для виготовлення пончиків, визначати параметри теплового процесу обсмажування пончиків, аналізувати результати досліджень.



### 3 Загальні відомості

При обробці продуктів смаженням проміжним теплоносієм, що контактує з продуктом, є рослинний або тваринний жир. У свою чергу, жир розігрівається парою або нагрівачами інших видів. Обробка ведеться при порівняно високій температурі 120...160 °С. У продукті під дією теплоти протікає ряд пов'язаних між собою фізичних та фізико-хімічних процесів, у результаті чого відбуваються виділення і видалення частини вологи, вбирання олії, об'ємна усадка продукту, збільшення пористості, а також зміна щільності і теплоємності продукту.

Швидкість процесів, що протікають у продукті, залежить від форми і розмірів продукту, температури олії, умов теплообміну між олією і продуктом та інших факторів.

Процес обсмажування поділяють на два періоди. При рівновазі процесу, коли теплота, що надійшла від пари до олії, дорівнює теплоті, відданої олією продукту, інтенсивність теплообміну можна описати так:

Для першого періоду:

$$k \cdot S \cdot \tau (t_n - t_o) \beta = \alpha_3 \cdot S_{np} \cdot \tau (t_o - t_{\text{вип}})$$

Для другого періоду:

$$k \cdot S \cdot \tau (t_n - t_o) \beta = (\lambda_k / \delta_k) \cdot S_{np} \cdot \tau (t_o - t_{\text{вип}}).$$

де  $k$  - коефіцієнт теплопередачі; Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $S$  - площа поверхні нагрівання, м<sup>2</sup>;  $\tau$  - тривалість теплообміну, с;  $t_n$  і  $t_o$  - відповідно температури пари і олії, °С;  $\beta$  - коефіцієнт, що враховує теплоту, сприйняту продуктом ( $\beta = 0,6...0,7$ );  $\alpha_3$  - коефіцієнт тепловіддачі від олії до продукту, Вт / (м<sup>2</sup>· °С);  $S_{np}$  - площа поверхні продукту, що контактує з олією, м<sup>2</sup>;  $t_{np}$  - температура поверхні продукту, °С;  $\lambda_k$  - коефіцієнт теплопровідності скоринки продукту, Вт / (м<sup>2</sup>·°С);  $\delta_k$  - товщина скоринки продукту, м;  $t_{\text{вип}}$  - температура випаровування вологи в продукті, °С ( $t_{\text{вип}} = 100^\circ$ ).

При обсмажуванні видалається, головним чином, вільна волога, що виділилася з клітин після їх плазмолізу під дією високої температури. Максимальна кількість вологи видалається у перший період, тобто, в період нагрівання шматочків продукту.

Видалення з продукту вологи назовні відбувається, в основному, під дією градієнта загального тиску. При цьому в перший період обсмажування рух вологи назовні дещо гальмується через рух частини рідини до центру зразка під дією градієнта температури. З підвищенням температури олії швидкість виділення вологи з виробу збільшується.

Аналіз рівнянь показує, що швидкість руху олії уздовж поверхні продукту інтенсифікує теплообмін тільки в перший період обсмажування, коли ще немає скориночки і при передачі теплоти здійснюється головним чином, конвекція, а випаровування вологи відбувається у поверхневих шарах продукту.

У другій період, коли утворюється скоринка, яка являє собою значний термічний опір, швидкість олії уздовж поверхні продукту дуже мало впливає на інтенсивність теплообміну.

Тривалість обсмажування залежить від багатьох чинників і, насамперед, від виду продукту, ступеня подрібнення (розмірів шматочків), температури олії, способу обсмажування, початкового і кінцевого вологовмісту продукту, швидкості видалення вологи, товщини скоринки та ін.

#### **4 Призначення, будова і принцип дії автомата АП-3М**

Автомат для приготування та смаження пончиків АП-3М входить до групи технологічних автоматів для приготування виробів з рідкого тіста, таких як автомати для приготування та смаження пиріжків АЖ-2П та АЖ-3П, автомат для випікання млинців АВП та ін.

Апарат АП-3М призначений для формування пончиків з рідкого тіста та обсмажування їх у фритюрі.

Апарат складається з таких основних вузлів: каркаса, встановленого на чотирьох стійках 2, бака для обсмажування, закритого двома кришками 15, редуктора 4, приводного диска 5 з лопатками 6, дозатора 7, привода дозатора 8, бака для тіста 9, бака доливання олії 10, компресора 12. В середині каркаса 1 встановлений щит керування 13, пульт керування розташований у передній частині бака 10.

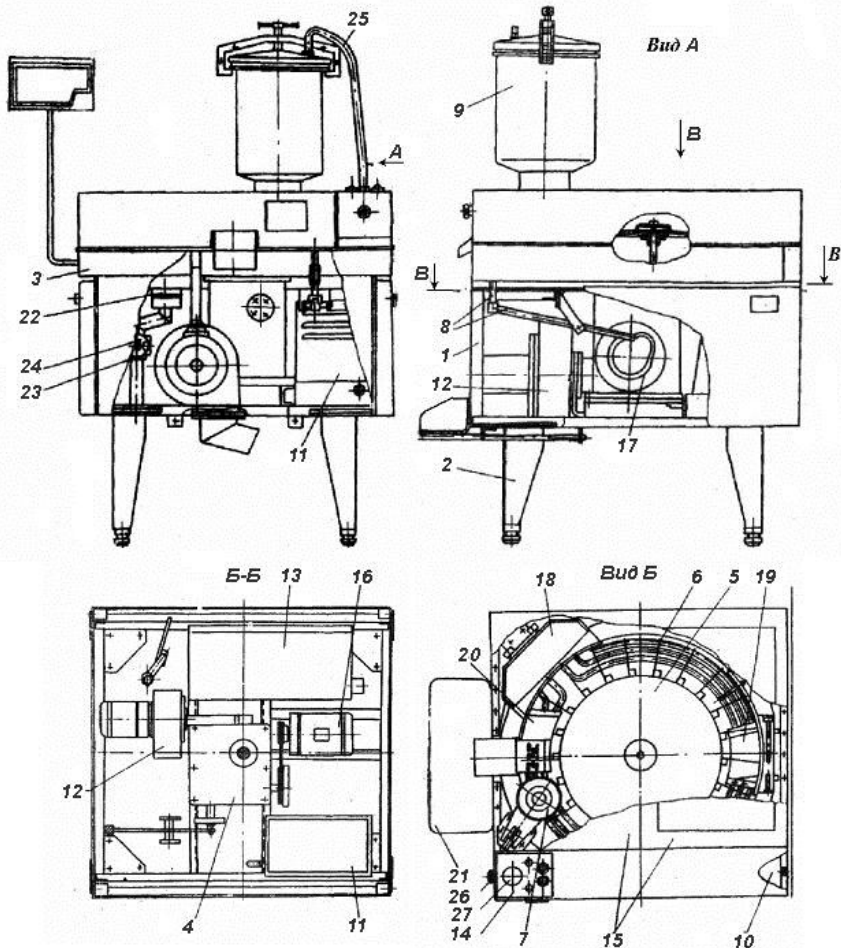


Рисунок 1 – Схема автомата для смаження пончиків АП-3М

1 - каркас; 2 - стійки; 3 - бак для смаження; 4 - редуктор; 5 - приводний диск; 6 - лопатка; 7 - дозатор; 8 - важільна система; 9 - бак для тіста; 10 - бак доливання олії; 11 - компресор; 12 - вентилятор; 13 - щит керування; 14 - пульт керування; 15 - кришка; 16 - двигун; 17 - кулак; 18 - нагрівач; 19 - гірка; 20 - склиз; 21 - приймальна тара; 22 - відстійник; 23 - зливний кран; 24 - відрізний стакан дозатора; 25 - повітропровід; 26 - дросель; 27 - манометр.

Робота апарата здійснюється наступним чином. Двигун 16 через клинопасову передачу передає обертаючий момент на редуктор 4, що має дві черв'ячні пари. На входному кінці проміжного вала насаджений кулак 17. На вихідному кінці редуктора закріплений диск 5 з лопатками 6, що мають можливість обертатися навколо шарніра. Лопатки 6 рухаються у внутрішньому кільці бака для смаження 3, заповненого фритюром. У камері ванни розташований корпус нагрівача. У зоні також є отвір з увареним патрубком, через який здійснюється злив олії. Для видалення крихт тіста в нього встановлюється фільтр.

Тісто, завантажене у бак, під дією своєї ваги та тиску повітря потрапляє у дозатор 7 та заповнює внутрішню порожнину корпусу дозатора. При підйомі відсікача тісто відсікається, утворюючи кільцевидну заготовку пончиків. Тиск повітря створюється компресором 11. З ресивера повітря по повітропроводу 25 потрапляє у бак для тіста 9. Регулювання величини тиску в пневмосистемі проводиться дроселем 26, а контроль – манометром 27.

Нагрівання фритюру здійснюється теплоелектронагрівачами (ТЕНами) вузла нагрівача 18.

На внутрішньому кільці бака для смаження передбачені гірка 19 та склиз 20. На гірці 19 виконується перевертання пончиків на 180°, тобто необжареним боком донизу, а на склизі 20 – здійснюється викидання готового пончика з бака у приймальну тару 21. За допомогою бака підтримки рівень олії, вона автоматично залишається постійним.

Лопатки, що підходять до гірки 19 та склизу 20, наїжджають на них та коливаються навколо своїх осей. Дозатор вмикається відкриттям шибери і тістові заготовки пончиків з нього потрапляють між лопатками, переміщуючись ними по баку для смаження. Пружини утримують лопатки диска у нижньому положенні. До диска кріпиться скребок, який видаляє з дна ванни крихти тіста у фільтр. Бак має відстійник 22 та зливний кран 23.

Температура олії та її рівень у баку контролюється та підтримується електричною схемою автоматично.



Рисунок 2 – Фото загального вигляду автомата АП-3М



Рисунок 3 – Фото робочого простору автомата АП-3М

### *Технічна характеристика апарата АП-3М*

Продуктивність, шт/год.	500-580
Маса випеченого пончика, г	40-50
Місткість ванни, для смаження, л	10
Місткість бака для тіста, л	20
Місткість бака доливання олії, л	13,5
Межі регулювання дозатора, г	35-55
Тиск повітря у бачку для тіста, МПа	0,02-0,07
Температура олії, С°	175-190
Час розігріву олії до робочої температури, хв.	35...40
Потужність електродвигуна, кВт	0,27
Маса, кг	250

### **5 Вимоги безпеки**

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“. Забороняється відкривати кришки робочої зони автомата під час його роботи. Усунення несправностей та регулювання механізмів проводити тільки після остигання олії до кімнатної температури.

## 6 Методика проведення експерименту

6.1 Визначення геометричних параметрів робочої камери апарата  
Прийняти поперечний перетин камери прямокутної форми.

Заміряти лінійкою (0...500 мм) радіус внутрішньої стінки робочої камери й визначити її внутрішній діаметр

$$d_k = 2r_k \quad (1)$$

Заміряти лінійкою (0...500 мм) радіус зовнішньої стінки робочої камери і визначити її зовнішній діаметр

$$D_k = 2R_k \quad (2)$$

Заміряти глибину робочої камери  $h_k$  глибиноміром штангенциркуля (0...125 мм).

Визначити об'єм робочої камери:

$$V_k = 0,25\pi \cdot h_k (D_k^2 - d_k^2). \quad (3)$$

Отримані параметри занести до таблиці 1.

Таблиця 1 – Геометричні параметри робочої камери

Позначення параметрів	$d_k$ (м)	$D_k$ (м)	$h_k$ (м)	$V_k$ (м)
Числове значення				

6.2 Визначення геометричних параметрів нагрівальних елементів (електричних ТЕНів)

Нагрівальні елементи розташовані в робочій камері по колу, огинаючи диск у три ряди.

Заміряти діаметри трьох ТЕНів  $D_m$  лінійкою (0...500 мм), заміри виконувати від осі симетрії ТЕНа, м.

Заміряти зовнішній діаметр спіралі ТЕНа  $d_m$  штангенциркулем (0...125мм), м.

Визначити довжину кожного ТЕНа, м.

$$L_{mi} = \pi \cdot D_{mi} + 2l_{mi} - \delta_{mi}. \quad (4)$$

Визначити поверхню тепловіддачі кожного ТЕНа

$$S_{mi} = \pi \cdot d_{mi} \cdot L_{mi} . \quad (5)$$

Отримані параметри занести в таблицю 2.

Таблиця 2 – Геометричні параметри нагрівальних елементів

Позначення параметрів	$D_m$ , м	$d_m$ , м	$L_m$ , м	$S_m$ , м <sup>2</sup>
ТЕН №1				
ТЕН №2				
ТЕН №3				

### 6.3 Визначення електричних параметрів тенів

Заміряти опір ТЕНів тестером  $R_{mi}$

Заміряти напругу на кожному ТЕНі тестером  $U_{mi}$

Заміряти силу струму  $I_{mi}$  під час розігріву олії тестером

Визначити потужність ТЕНів:

$$P_{mi} = U_{mi}^2 / R_m . \quad (6)$$

Отримані параметри занести в таблицю 3

Таблиця 3 – Енергетичні параметри електронагрівачів

Позначення параметрів	$R_{mi}$	$U_{mi}$	$I_{mi}$	$P_{mi}$
ТЕН №1				
ТЕН №2				
ТЕН №3				

### 6.4 Експериментальне визначення технічних і технологічних показників апарата для приготування пончиків

Визначення маси транспортуючих пристроїв, кг

Від'єднати одну транспортуючу лопатку від приводного диска.

Зважити лопатку на електронних вагах  $g_{лон}$ .



Полічити кількість лопаток,  $K_{лон}$

Визначити масу усіх лопаток  $M = g_{лон} \cdot K_{лон}$  (7)

Заміряти частоту обертання приводного диска  $n$ , об/хв.

Отримані параметри занести в таблицю 4

Таблиця 4 – Основні параметри транспортуючих пристроїв

Позначення параметрів	$g_{лон}$ , кг	$K_{лон}$ , шт	$M$ , кг	$n$ , об/хв.
Числове значення				

6.5 Визначити продуктивність апарата

На діючому апараті визначити кількість пончиків, приготованих за 1 хвилину

Зважити кількість пончиків, приготованих за 1 хвилину  $G'$

Розрахувати продуктивність апарата, кг/с

$$G = G' / 60. \quad (8)$$

Порахувати кількість пончиків приготованих за 1 хвилину  $K_{пон}$

Визначити середню масу одного пончика

$$g_{пон} = G' / K_{пон}. \quad (9)$$

Зважити 10 заготовок з тіста.

Визначити вагу однієї заготовки тіста.

Визначити продуктивність апарата по тісту

$$G_{тз} = g_{тз} \cdot K_{лон}. \quad (10)$$

Отримані параметри занести в таблицю 5

Таблиця 5 – Експлуатаційні показники апарата для пончиків

Позначення параметрів	$\Pi$ , шт/хв.	$G'$ , кг/хв.	$G$ , кг/с	$K_{пон}$ ; шт/хв.	$g_{пон}$ , кг	$g_{тз}$ , кг	$G_{тз}$ , кг
Числове значення							

6.6 Заміряти температурні дані продукту і апарата електронним термометром:

Температура тіста,  $t_m$

Температура пончика  $t_n$

Температура олії  $t_o$

Температура стінки камери для обсмажування  $t_{кам}$

Температура лопаток транспортуючого механізму до нагріву  $t'_{т.м.}$

Температура лопаток після нагрівання  $t_{т.м.}$

Отримані параметри занести в таблицю 6.

Таблиця 6 – Температурні режими процесу смаження пончиків

Позначення параметрів	$t_m, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$t_o, ^\circ\text{C}$	$t_{кам}, ^\circ\text{C}$	$t'_{т.м.}, ^\circ\text{C}$	$t_{т.м.}, ^\circ\text{C}$
Числове значення						

## 7 Розрахунок кількості теплоти, які виділяють нагрівачі

7.1 Розрахунок потужності однієї спіралі нагрівача (ТЕНа) виконується за формулою:

$$P_m = U^2 / R_c, \quad (11)$$

де  $P_m$  - потужність одного ТЕНа, Вт;  $U$  - напруга в мережі, В;

$R_c$  - опір спіралі нагрівача, Ом.

Кількість тепла  $Q_m$ , яку виділяють нагрівачі:

$$Q_m = P \cdot \tau = \frac{U^2}{R_c} \cdot \tau, \quad (12)$$

де  $\tau$  - тривалість нагріву олії, с;

7.2 Розрахунок теплоти на нагрів продукту, Дж/с

$$Q_I = G \cdot C \cdot (t_n - t_m), \quad (13)$$

де  $G$  - продуктивність апарата за сировиною кг/с;

$t_m$  - температура тіста  $^\circ\text{C}$ ;  $t_n$  - температура пончика  $^\circ\text{C}$

7.3 Витрата тепла на випаровування вологи при обжарюванні, Дж/с

$$Q_2 = 0,01G \cdot x_u \cdot r \quad (14)$$

де  $x_u$  - дійсний процент ужарювання %;

$r$  - теплота випарювання ( $r = 2130$  кДж/кг).

7.4. Витрата тепла через стінки камери, Дж/с = Вт

$$Q_3 = \frac{\lambda}{\delta} \cdot S_{\kappa} (t_o - t_{\text{кам}}), \quad (15)$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу (або стінки), Вт/м·К;  $\delta$  - товщина стінки, м;  $S_{\kappa}$  - площа поверхні камери, м<sup>2</sup>;  $t_o$  - робоча температура олії, °С;  $t_{\text{кам}}$  - температура ізоляції або зовнішньої сторони стінки камери, °С.

$$S_{\kappa} = S_{\text{бок}} + S_{2\text{бок}} + S_{\text{дна}} \cdot \quad (16)$$

$$S_{\kappa} = \pi \cdot D_{\kappa} \cdot h + \pi \cdot d_{\kappa} \cdot h + 0,25(\pi \cdot D_{\kappa}^2 - \pi \cdot d_{\kappa}^2). \quad (17)$$

Витрати тепла на нагрівання транспортуючих пристроїв, Дж/с

$$Q_4 = G \cdot M \cdot C_m (t''_{mn} - t'_{mn}), \quad (18)$$

де  $M$  - маса транспортуючих пристроїв, кг;

$C_m$  - питома теплоємність сталі, Дж/кг·К;

$\tau$  - час нагріву транспортуючих засобів, с.

$t''_{mn}, t'_{mn}$  - температура транспортуючого пристрою до і після нагріву.

7.5 Витрати тепла тепловими потоками від вільної поверхні олії

$$Q_5 = C_o \cdot E \cdot S_{\text{вільн.пов.}} \cdot (0,01 T_o), \quad (19)$$

де  $C_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$  (Вт/м<sup>2</sup>к) - постійна Стефана - Больцмана;

$E$  - коефіцієнт теплового випромінювання,  $E \approx 1$ ;

$S_{\text{вільн.пов.}}$  - поверхня випромінювання, м<sup>2</sup>.

$$S_{\text{вільн.пов.}} = 0,25\pi(D_{\kappa}^2 - d_{\kappa}^2) \quad (20)$$

7.6 Загальні витрати тепла на виробництво пончиків, Дж/с

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 \quad (21)$$

При правильному виконанні розрахунків повинна бути виконана умова теплового балансу.

$$Q_T \approx Q \quad (22)$$

7.8 Кількість енергії, витраченої на виробництво одного пончика.

$$Q_{\text{понч.}} = Q/n. \quad (23)$$

Вартість одного пончика.

$$B_n = B_o + B_{el} + B_b + B_{\text{доод.}} \quad (24)$$

де  $B_o$  - Вартість соняшникової олії, грн.;

$B_{el}$  - Вартість електроенергії, грн.;

$B_b$  - Вартість борошна, грн.;

$B_{\text{доод}}$  - Вартість додаткових матеріалів, грн.

## 8 Контрольні питання

1 Яким способом на автоматі АП-3М формується пончик?

2 Як передається тепло від поверхні електричного нагрівача до тістової заготовки пончика?

3 Назвіть способи передачі теплоти і укажіть складові витрат теплоти при виробництві пончиків.

4 Поясніть фізичну сутність питомої теплоємності матеріалу?

5 За якою формулою визначаються витрати теплоти на нагрівання продукту, назвіть складові формули.

6 Укажіть з яких основних вузлів складається автомат для виробництва пончиків.

7 Назвіть основні складові конструкції привода автомата для виробництва пончиків.

8 Яка кількість рослинної олії заливається в автомат для виробництва пончиків і яка кількість олії може доливатися у процесі роботи?

9 Назвіть основні експлуатаційні показники автомата для виробництва пончиків.

## 9 Тестові завдання

1) При якій температурі олії проводиться обсмажування тістових заготовок пончиків?

- а) 105...125 °С;                      б) 175...190 °С;                      в) 225...250 °С.

2) Яким чином здійснюється подача рідкого тіста з бака в дозувальний пристрій?

- а) шестеренним насосом;                      б) самопливом (гравітаційно);  
в) самопливом і стисненим повітрям від компресора.

3) На якому пристрої відбувається перекидання пончика на 180° для обсмажування з другої сторони?

- а) на гірці;                      б) на склизі;                      в) на диску.

4) Укажіть напрям обертання робочого диска автомата АП-3М

- а) за годинниковою стрілкою;                      б) проти годинникової стрілки;  
в) напрям обертання не має значення.

5) Укажіть місткість ванни для смаження автомата АП-3М.

- а) 10 л;                      б) 20 л;                      в) 30 л.

### Рекомендована література

1 Поперечний А.М. Процеси та апарати харчових виробництв. / А.М. Поперечний, О.І. Черевко, В.Б. Гаркуша, Н.В. Кирпиченко та ін. - К.: Центр учбової літератури, 2007. - 304 с.

2 Антипов С.Т. Машины и аппараты пищевых производств. / С.Т. Антипов, И.Т. Кретов, А.Н. Остриков, В.А. Панфилов, О.А. Ураков. - М.: Высшая школа, 2001. - 680 с.

3 Белобоков В.В. Тепловое оборудование предприятий общественного питания. / В.В. Белобоков, Л.И. Гордон. - М.: Экономика, 1983. - 302 с.

4 Остриков А.Н. Практикум по курсу «Технологическое оборудование». / А.Н.Остриков. - Воронеж, 1999. - 423 с.

5 Кирпичников В.П. Справочник механика: (Общественное питание)/ В.П. Кирпичников, Г.Х. Леенсон - М.: Экономика, 1990. - 382 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НАСИЧЕННЯ ВОДИ ВУГЛЕКИСЛИМ ГАЗОМ НА АБСОРБЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ

**Мета роботи:** Визначити основні параметри і ступінь їх впливу на процес насичення води вуглекислим газом на експериментальній абсорбційній установці для газування напоїв.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути будову та принцип дії експериментальної установки для газування напоїв;
- розрахувати основні параметри процесу насичення води вуглекислим газом;
- провести експериментальні дослідження процесу абсорбції вуглекислого газу у воду;
- обробити статистично результати експерименту;
- побудувати графіки основних залежностей параметрів процесу;
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

**- повторити:**

- 1) основні загальні питання процесу абсорбції, теоретичні основи процесів насичення рідин газом;
- 2) основні способи і машини, які застосовуються для приготування харчових газованих напоїв;

**- знати:**

- 1) застосування процесу абсорбції у харчовій промисловості;
- 2) місце абсорбційного обладнання у технологічних лініях харчових виробництв, класифікацію основних конструкцій абсорберів;
- 3) основні переваги та недоліки процесу абсорбції;

**- вміти:** проводити налаштування експериментальної установки, користуватися контрольно-вимірними приладами, проводити визначення аналітичних та графічних залежностей за темою досліджень.

## **3 Загальні відомості про насичення рідини газом**

### **3.1 Процес абсорбції та його основні закономірності**

Абсорбцією називають процес поглинання газу рідким поглиначем, у якому газ розчинний у тому або іншому ступені.

У абсорбційних процесах беруть участь дві фази – рідка і газова та відбувається перехід речовини з газової фази в рідку. Таким чином, абсорбційні процеси є одним з видів процесів масопередачі.

На практиці процес абсорбції застосовують, здебільшого, не для окремих газів, а для газових сумішей, складові частини яких (одна або декілька) можуть поглинатися даним поглиначем у певних кількостях. Складові частини, що абсорбуються, називають абсорбативами або просто компонентами, а складові частини, які не поглинаються – інертами.

Рідка фаза складається з поглинача (абсорбенту) і компонента, що абсорбується. У багатьох випадках поглинач являє собою розчин активного компонента, що вступає у хімічну реакцію з компонентом, що абсорбується, при цьому речовина, в якій розчинений активний компонент, є розчинником.

Протікання абсорбційних процесів характеризується їх статикою і кінетикою.

Статика абсорбції, тобто рівновага між рідкою і газовою фазами визначає стан, який встановлюється при досить тривалому контакті фаз. Рівновага між фазами визначається термодинамічними властивостями компонента та поглинача і залежить від складу однієї з фаз, температури та тиску.

Кінетика абсорбції, тобто швидкість процесу масообміну, визначається рушійною силою процесу (тобто ступенем відхилення системи від рівноважного стану), властивостями поглинача, компонентів і інертного газу, а також способом контактування фаз (будовою абсорбційного апарата і гідродинамічним режимом його роботи).

У абсорбційних апаратах рушійна сила, як правило, змінюється за їх довжиною і залежить від характеру взаємного руху фаз (пряма течія, протитечія, перехресні струмені і т. д.). При цьому можливе здійснення безперервного або ступеневого контакту.

У абсорбера з безперервним контактом характер руху фаз не змінюється по довжині апарата і зміна рушійної сили відбувається безперервно. Абсорбери зі ступінчастим контактом складаються з кількох ступенів.

Розрізняють хімічну абсорбцію і фізичну.

При фізичній абсорбції розчинення газу у воді не супроводжується хімічною реакцією (або, принаймні, ця реакція не робить помітного впливу на процес).

У даному випадку над розчином існує більш-менш значний рівноважний тиск компонента і поглинач, який спостерігається лише до тих пір, поки його парціальний тиск у газовій фазі вищий за рівноважний тиск над розчином. Повний витяг компонента з газу при цьому можливий тільки при протитоку і подаванні до абсорбера чистого поглинач, який не містить інших компонентів.

При хімічній абсорбції компонент, що абсорбується, зв'язується у рідкій фазі у вигляді хімічної сполуки. При незворотній реакції рівноважний тиск компонента над розчином мізерно малий і можливе повне його поглинання. При зворотній реакції над розчином існує помітний тиск компонента, хоча і менший, ніж при фізичній абсорбції.

### **3.2 Вимоги, що пред'являються до питної води**

Для отримання якісної мінеральної газованої води треба щоб вода відповідала наступним фізико-хімічним властивостям:

*Колір.* Забарвлення води може вказувати на характер порід, якими вона рухається. Чиста питна вода не повинна мати забарвлення.

*Прозорість.* Це одна з вимог, яка висувається до питної води. Згідно з нею, питна вода може містити завислі речовини в дуже незначній кількості. Оскільки всяке помутніння впливає на смакові якості, мутна вода шкідлива для здоров'я.

За ступенем прозорості воду умовно поділяють на прозору, слабо прозору, слабо каламутну, каламутну і сильно каламутну. Прозорість води, яка використовується для лікувальних ванн, так само, як і колір, нормами не регламентується.



*Запах.* Запах води має важливе значення. Він вказує на можливе забруднення її різними речовинами органічного і мінерального походження, на більший вміст у ній заліза; запах сірководню свідчить про те, що вода піднімається з великих глибин. Питна вода не повинна мати ніякого запаху, особливо запаху гнилі, оскільки він робить її непридатною для споживання. Неприємний також болотний, рибний запах і багато інших. Ці вимоги висуваються звичайно до води, яка використовується з метою питного водоспоживання.

*Смак.* Смак води має велике значення для пізнання генезису підземних вод. Солонуваті або солоні підземні води дають можливість говорити про їх зв'язок з соленосними відкладами, або з породами, які містять підвищений вміст солей, чи показують на глибинне походження вод. Кислий смак води може вказувати на наявність у воді вільних кислот (сіркової або вугільної).

*Густина.* Як відомо, дистильована вода при температурі 4°C має густину, рівну одиниці.

Але природна підземна вода завжди містить у собі деяку кількість мінеральних речовин, які попадають у неї з повітря разом із атмосферними опадами і в результаті розчинення і вилуговування порід, з якими вона стикається при русі в надрах земної кори. Тому її густина завжди більша за одиницю, причому чим більше в ній розчинених речовин, тим більша її густина.

*Температура.* Температура води має велике значення. Постійна температура підземної води вказує на те, що вода піднімається з досить великих глибин, на які не впливають зміни температури повітря за порами року; дуже низька температура підземної води характерна для областей розвитку зон багаторічних мерзлих порід; температура води, близька до температури повітря певного пункту, вказує на неглибоке її залягання від поверхні землі. Виходи на поверхню теплих або гарячих підземних вод майже завжди свідчать про походження на схожих ділянках зон розривних порушень. Нарешті, температура підземної води, близька до температури поверхневих водотоків, вказує на тісний взаємозв'язок їх між собою і на живлення ґрунтових вод річковими.

Питна вода вважається смачною і має освіжаючі властивості, якщо її температура в межах 7...11°C, не нижча за 5°C і не вища за 15°C.

*Концентрація водневих іонів (рН).* Концентрація водневих іонів у підземних водах невелика, але її значення велике. Вона дозволяє визначати форми стану у воді вуглецевої, кремнієвої, сірководневої і фосфорної кислот, насиченість води слабкими основами; з'ясувати умови розвитку біологічних і хімічних процесів, які відбуваються у водомістких товщах земної кори.

Концентрація водневих іонів залежить від температури води, ступеня її мінералізації, характеру розчинених у ній речовин, від співвідношення кількості вугільної кислоти та іонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  та  $\text{CO}_3^{2-}$ , дисоціації органічних кислот. У водах, які мають нейтральну реакцію, рН дорівнює 7, при кислій реакції рН менше 7, при лужній більше 7. За стандартну температуру при експериментальних визначеннях рН приймають 18°C, при якій нейтральна вода має рН 7,07.

*Окислювально-відновлювальний потенціал (Еh)* показує інтенсивність окислювальної чи відновлюваної дії системи і, таким чином, дає уявлення про природні умови формування підземних вод.

Для вод, які, без сумніву, мають лікувальний ефект, характерні від'ємні значення Еh, що вказує на розвиток у них анаеробних процесів бактеріального руйнування органічної речовини, особливо процесу сульфатредукції, який обумовлює появу у воді сірководню.

Води, які характеризуються слабкими лікувальними властивостями, мають позитивне значення Еh (близько 100...300 мВ). Це вказує на те, що ці води формуються у перехідних окисно-відновних умовах.

Крім того, мінеральні води характеризуються вмістом макроелементів ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{FeCO}_3$ , глинозему) та мікроелементів ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Ba}_2^+$ ,  $\text{Sr}_2^+$ ,  $\text{Fe}_2^+$ ,  $\text{Fe}_3^+$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{HPO}_4$ ,  $\text{HBO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ra}$ ,  $\text{Rn}$  та ін.) хімічного складу; вмістом органічних речовин (вуглеводні, феноли, бітуми, лізини, гумінові речовини, жирні кислоти та ін.), мікрофлори (бактерії), газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$  та ін.).

### 3.3 Теоретичні основи процесу абсорбції при газуванні води

У виробництві газованих вод абсорбція здійснюється у протитечійних апаратах безперервної дії, у яких газ і рідина приводяться в тісний контакт (рисунок 1).

Інертний газ, що не поглинається ( $V$  у кмоль/с), при вході в апарат містить деяку кількість компонента, який поглинається. Позначимо його концентрацію  $y_n$  (у кіломолях на 1 кмоль інертного газу).

При проходженні газової суміші через абсорбер кількість інертного газу не змінюється, а концентрація компонента, що поглинається, зменшується до  $y_k$  кмоль/кмоль.

Рідкий поглинач надходить в абсорбер у кількості  $W$  кмоль/год. Вміст компонента, що поглинається в рідині: при її вході в абсорбер -  $x_n$  кмоль/кмоль чистого абсорбенту; при виході з апарата -  $x_k$ .

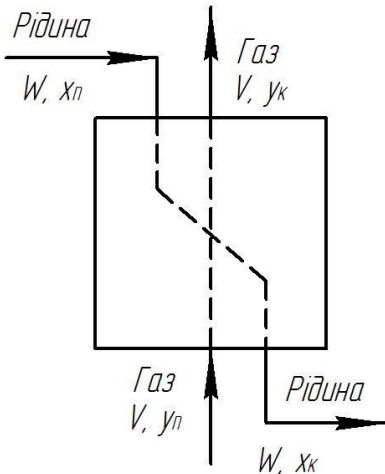


Рисунок 1 – Схема взаємодії рідини і газу в процесі абсорбції.

На підставі закону збереження речовини можна скласти рівняння матеріального балансу абсорбційного процесу для компонента, що поглинається

$$V \cdot y_n + W \cdot x_n = V \cdot y_k + W \cdot x_k. \quad (1)$$

При складанні цього балансу ми нехтуємо можливими втратами при проведенні процесу.

З рівняння (1) маємо:

$$V(y_n - y_k) = W(x_k - x_n) = M, \quad (2)$$

де  $M$  - кількість компонента, переданого з однієї фази в іншу, кмоль/с.

З рівняння (2) випливає, що питома витрата абсорбенту (кмоль/кмоль)

$$m = \frac{W}{V} = \frac{y_n - y_k}{x_k - x_n}, \quad (3)$$

де  $m$  - питома витрата абсорбенту;

$W$  - кількість рідкого поглиначя (абсорбенту), яка надходить в апарат, кмоль/год.;

$V$  - кількість газу, що не поглинається, яка проходить через апарат (кмоль/с);

$y_n$  - концентрація компонента, що поглинається, в газі на початок процесу;

$y_k$  - концентрація компонента, що поглинається, на виході з апарата;

$x_n$  - концентрація поглиненого компонента в рідині на вході в апарат;

$x_k$  - концентрація поглиненого компонента в рідині на виході з апарата.

Рівняння (2) графічно зображується прямою лінією, побудованою у координатах  $x$ - $y$ , на рисунку 2 ця лінія позначена  $AB$ . Кутовий коефіцієнт цієї лінії дорівнює  $m$  тобто  $\operatorname{tg} \alpha = m$ .

Лінія  $AB$  називається робочою лінією. За допомогою цієї лінії

встановлюється зв'язок між складом рідини і складом газу для будь-якого перетину апарата. Так, якщо в якомусь перерізі апарата вміст у газі компонента, що поглинається,  $y_c$ , то вміст цього компонента в рідині буде складати  $x_c$ . Робоча лінія дозволяє встановити умови, за яких процес абсорбції стане можливим.

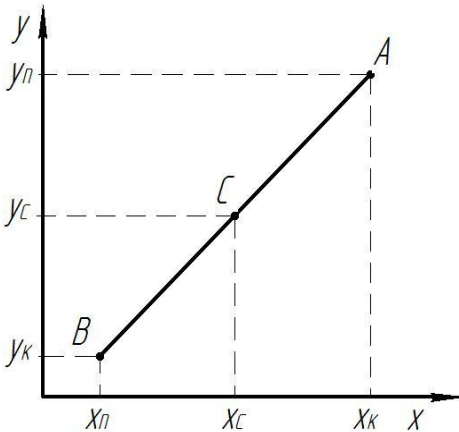


Рисунок 2 – Графік робочої лінії абсорбції

Розглянемо рівновагу газу і абсорбенту (рідина).

Застосуємо для цього правило фаз

$$S = K - f + 2, \quad (4)$$

де  $S$  - число ступенів свободи;

$K$  - число компонентів системи;

$f$  - число фаз системи.

У розглянутому випадку ми маємо дві фази (газ і рідина) і три компоненти (компонент, що поглинається, інертний газ і рідина). Визначальними параметрами будуть тиск, температура і концентрація. Поглинається один компонент газової суміші.

$$S = 3 - 2 + 2 = 3$$

Цими трьома ступенями свободи є склад однієї з фаз, тиск і температура. Вміст компонента в іншій фазі не може бути вибраний довільно. Він визначається трьома обраними параметрами.

Для ідеальних розчинів, у яких сили взаємодії між молекулами компонентів системи однакові, умови рівноваги визначаються законом Генрі: „При постійній температурі розчинність газу в даній рідині прямо пропорційна парціальному тиску цього газу над розчином“.

$$P = E \cdot X, \quad (5)$$

де  $P$  - парціальний тиск газу, рівноважний з розчином, що має концентрацію  $X$ ;

$E$  - константа Генрі (константа газової рівноваги)

або 
$$X = P/E \quad (6)$$

При розгляді виробничих апаратів (абсорберів) важливо знати кількості речовини, які передається з однієї фази в іншу за одиницю часу.

Основне рівняння масопередачі при абсорбції можна представити в наступному вигляді:

$$M = K \cdot S \cdot \Delta C \cdot \tau, \quad (7)$$

де  $M$  - маса речовини, що передається з газової фази в рідку, кг;

$S$  - площа поверхні контакту фаз, м<sup>2</sup>;

$K$  - коефіцієнт абсорбції, визначається експериментально;

$\Delta C$  - рушійна сила (різниця концентрації або різниця тисків, Па);

$\tau$  - тривалість процесу, год.

### **3.4 Основи процесу виробництва газованих напоїв**

Одним з основних показників, що характеризують якість газованих безалкогольних напоїв, є вміст у них двоокису вуглецю. Напої, ним насичені, мають чудовий смак та ефективно угамовують спрагу.

Двоокис вуглецю вигідно доповнює смак напоїв, підсилює виділення ароматичних речовин і, крім того, є прекрасним консервантом, пригніблюючим розвиток мікроорганізмів і рідині.

Для насичення напоїв зазвичай вживають рідкий двоокис вуглецю і проводять цю операцію у спеціальних апаратах сатураторах та установках синхронного змішування.

Міра насичення напоїв і води двоокисом вуглецю залежить від його спроможності розчинятися у компонентах напою, від температури напою, тиску, при якому проводиться процес насичення, тривалості контакту, поверхні обміну, наявності повітря у двоокисі вуглецю і воді, конструкції обладнання, яке вживається для насичення.

Уводити діоксид вуглецю у напої можна двома способами: 1) насиченням охолодженої і деаерованої води з подальшим уведенням її в пляшки, залиті певною дозою купажного сиропу, і 2) насиченням суміші деаерованої води і купажного сиропу з подальшим розливом вже насиченого напою.

Температура води (або напою) в процесі насичення її двоокисом вуглецю не повинна перевищувати 6 °С. Охолоджена вода повинна проходити найбільш коротку дорогу від холодильника до сатуратора, щоб уникнути нагрівання.

### **4 Оснащення робочого місця лабораторної роботи**

Для проведення дослідження за темою заняття застосовується установка, яка дає можливість змінювати температуру води при її газуванні, схема якої показана на рисунку 3.

Працює установка за принципом холодильної машини, але її головною відмінністю є те, що у випарнику 5 встановлений резервуар з водою, у який подається вуглекислий газ і вода по трубах через зворотні клапани 9. Також у випарнику встановлена мішалка 8, яку приводить у дію електродвигун. Вона дозволяє рівномірно розподіляти газ по об'єму води.

Для зручності експлуатації з резервуара виведена трубка рівня, за допомогою якої визначають ступінь насичення резервуара водою. Також резервуар оснащений краном для газованої води.

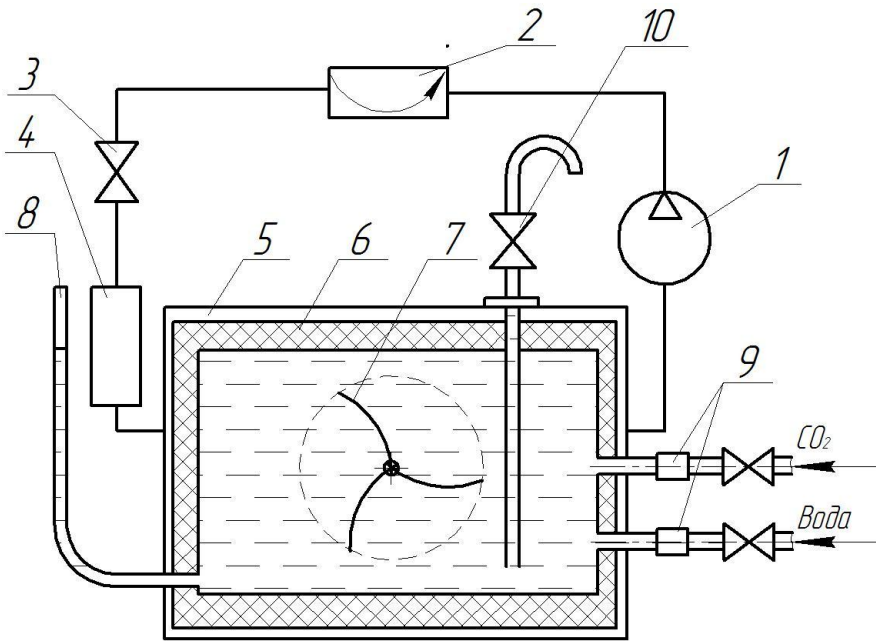


Рисунок 3 – Схема установки для газування води

1 - компресор; 2 - конденсатор; 3 - терморегулюючий вентиль; 4 - фільтр; 5 - випарник; 6 - термоізоляція; 7 - мішалка; 8 - показчик рівня води; 9 - зворотній клапан, 10 - кран газованої води.

Для виміру тиску води в баку установки використовується манометр індукційно-трансформаторного типу з границею виміру 6 МПа.



Температура води вимірюється за допомогою універсального цифрового мультиметра марки DT838, оснащеного термопарою (рисунок 4). Електроди термопари поміщені в герметичний гнучкий кабель з мінеральною ізоляцією. Точність вимірів температури мультиметром  $\pm 0,5 \%$ .

Рисунок 4 – Цифровий мультиметр DT838

## 5 Методика експериментального дослідження

- 1) Відкрити кран підведення води до фільтра і заповнити його водою.
- 2) Відкрити вентиль випуску повітря з камери для газування.
- 3) Відкрити жовтий кран подачі води в камеру для газування і заповнити її до встановленого рівня. Рівень води в камері перевіряється за допомогою трубки 8 (рисунок 3). Рівень води встановлюється з таким розрахунком, щоб над поверхнею води в сатураторі утворився газовий простір, рівний 10% об'єму сатуратора.
- 4) Увімкнути холодильну установку і охолодити воду до необхідної температури  $t$  °C.
- 5) Закрити вентиль випуску повітря з сатуратора.
- 6) Увімкнути мішалку за допомогою тумблера, розташованого на панелі установки.
- 7) Відкрити вентиль газового балона і подавати газ до тих пір, поки тиск у сатураторі не досягне 0,3...0,4 МПа. Після цього вимкнути подачу вуглекислого газу. Зафіксувати час газування  $\tau$ .
- 8) Вимкнути мішалку через 1...2 хвилини після відключення подачі вуглекислого газу.
- 9) Встановити пляшку з газованою водою у пристосування для вимірювання тиску в газовому середовищі над напоем (рисунок 6).



Для визначення ступеня насичення води вуглекислим газом використовується метод, заснований на вимірюванні тиску в газовому середовищі над напоем в закритій пляшці і розрахунком масової частини двоокису вуглецю  $CO_2$  в залежності від виміряного тиску і температури напою згідно ГОСТ-6687.0.

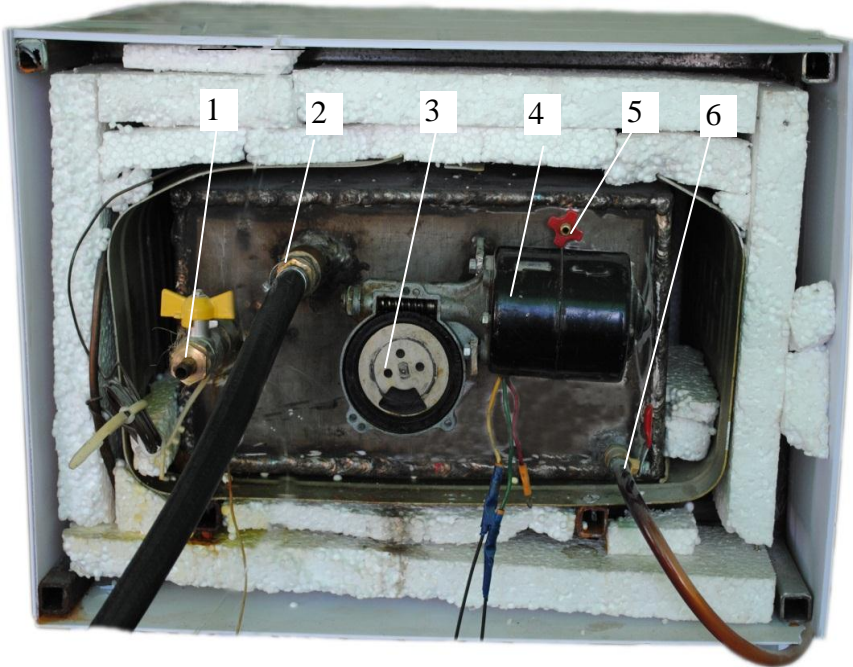
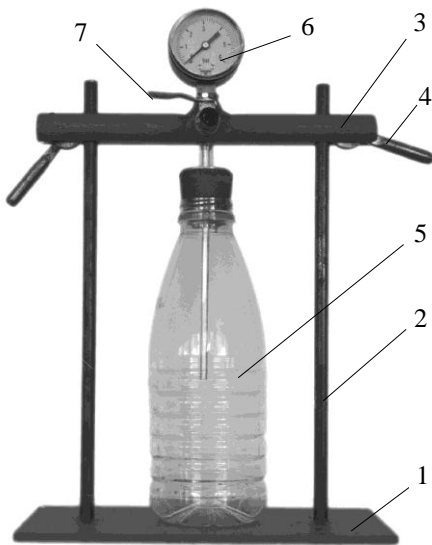


Рисунок 5 - Установка для газування води

1 - кран для подачі води; 2 - вихід підключення термопари; 3 - редуктор мішалки; 4 - електродвигун мішалки; 5 - кран випуску повітря та газу; 6 - кран для подачі газу в установку.

10) З'єднати кран для заправки пляшки газованою водою з краном подачі води з сатуратора за допомогою трубки і затискачів.

11) Відкрити краник випуску повітря з пляшки і заповнити пляшку газованою водою до певного рівня. закрити кран подачі газованої води і краник випуску повітря з пляшки.



12) Визначити тиск вуглекислого газу над газованим напоєм у пляшці за манометром пристосування.

13) Послабити натиснення траверси пристрою на пляшку і знизити тиск на манометрі до нуля. Зняти пляшку з пристрою.

14) За визначеним тиском і температурі напою визначити масову частку двоокису вуглецю в газованій воді (додаток А, таблиця А1).

Рисунок 6 – Пристосування для визначення тиску в пляшці

1 - основа; 2 - стійка; 3 - траверса; 4 - фіксатор; 5 - пляшка; 6 - манометр; 7 - кран.

15) Експериментальні дані занести в таблицю 1.

16) Привести установку у вихідне положення, приборати робоче місце.

Таблиця 1 – Експериментальні параметри процесу насичення води вуглекислим газом.

Номер досліду	Час подачі газу $\tau$ , хв	Температура води $t$ , °C	Тиск газованої води $P_a$	Масова частка двоокису вуглецю $CO_2$ , %
1				
2				
3				
4				
5				

### 6 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись загальної інструкції з охорони праці, наведених в розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## 7 Обробка результатів експерименту

1) За результатами дослідів побудувати графіки залежності тиску газу над напоем від температури води  $p = f(t)$  та часу насичення  $P = f(\tau)$  (див. рисунок 7).

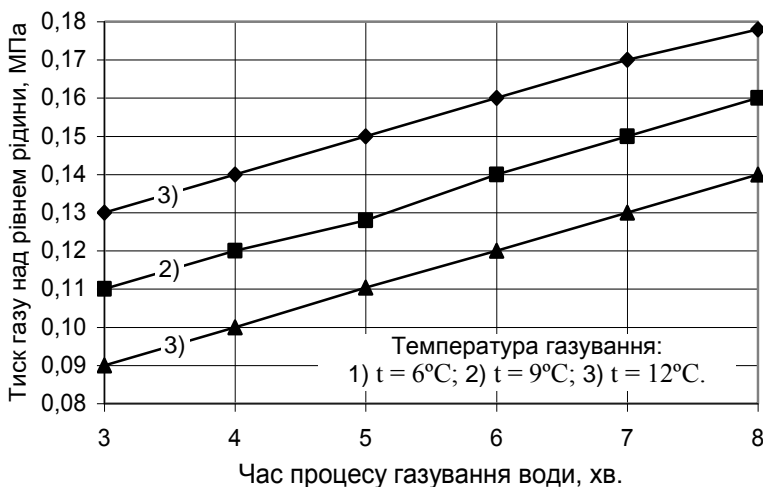
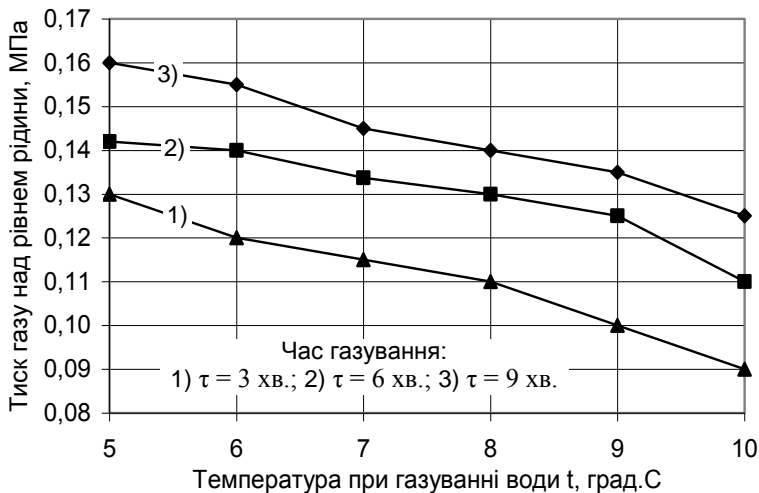


Рисунок 7 – Приклад оформлення графіків залежності тиску газу над рівнем води від температури води і часу газування

- 2) Провести докладний аналіз результатів досліджень.
- 3) Оформити звіт з роботи згідно з переліком етапів, рекомендацій у розділі „Загальні організаційно-методичні передумови“.

## **8 Контрольні питання**

- 1 На якому явищі базується процес абсорбції?
- 2 У яких технологіях харчового виробництва використовується процес абсорбції?
- 3 Який процес називають процесом десорбції і як його можна використовувати у виробництві?
- 4 Як називають газ, який розчиняється у рідкому поглиначі?
- 5 З яких основних елементів складається експериментальна установка для газування води?
- 6 Якими приладами вимірюється тиск газу і температура води при її газуванні?
- 7 Яким способом охолоджується вода в установці для газування?
- 8 Назвіть послідовність операцій при газуванні води.
- 9 Для чого використовують мішалку і на якій стадії процесу газування її вмикають?
- 10 Яким чином вимірюється тиск газу в пляшці?

## **9 Тестові завдання**

### **1) Вкажіть на явище, яке описується терміном „абсорбція“**

- 1 поглинання газу або рідини рідкою або твердою речовиною;
- 2 виділення газу або рідини з рідкої або твердої речовини;
- 3 поглинання рідкої або твердої речовини газом або рідиною.

### **2) Компонент (газ, пара), що абсорбується у рідині, називають...**

- 1 ...абсорбентом;            2 ...абсорбтивом;            3 ...абсорбатом.

### **3) Як називають компонент (газ), що не поглинається рідиною при абсорбції?**

- 1 абсорбатом;            2 інертом;            3 абсорбентом.

**4) Укажіть найбільш вірне формулювання закону В. Генрі, що пояснює принципи насичення рідини газом.**

1 При постійній температурі розчинність газу в даній рідині прямо пропорційна парціальному тиску цього газу над розчином;

2 При постійній температурі розчинність газу в даній рідині зворотно пропорційна парціальному тиску цього газу над розчином;

3 При постійній температурі розчинність газу в даній рідині не залежить від парціального тиску цього газу над розчином.

**5) Який вид залежності демонструє графік робочої лінії процесу абсорбції?**

1 логарифмічну;                      2 степеневу;                      3 лінійну.

**6) Яку речовину звичайно застосовують для виготовлення газованих напоїв?**

1 двоокис сірки;                      2 двоокис вуглецю;  
3 двоокис кремнію.

**7) При яких значеннях тиску і температури рекомендують проводити процес газування води?**

1 350...400 МПа при не менше 20...30 ° С;

2 35...40 МПа при температурі не більше 22...23 ° С;

3 0,35...0,4 МПа при температурі не більше 6...10 ° С.

**8) Яким способом у лабораторній установці проводять вимірювання температури води у процесі її газування?**

1 термоелектричним (за допомогою термопари);

2 контактним (за допомогою спиртового термометра);

3 дистанційним (за допомогою пірометра);

**9) Як коротко називають технологічний апарат для приготування газованих напоїв?**

1 сепаратор;                      2 сатуратор;                      3 стерилізатор.

**10) Наведіть найбільш повний і вірний перелік властивостей, що розглядаються при оцінці якості води для її газування.**

1 колір, прозорість, запах, смак, густина, температура, концентрація водних іонів (рН), окислювально-відновлювальний потенціал (Eh);

2 колір, прозорість, запах, густина, температура, концентрація водних іонів (рН), окислювально-відновлювальний потенціал (Eh);

3 колір, прозорість, запах, смак, мутність, температура, концентрація водних іонів (рН), окислювально-відновлювальний потенціал (Eh)

### **Література**

1 Мельник Б.Е. Технология переработки воды / Б.Е. Мельник. - М.: Агропромиздат, 1990. - 445 с.

2 Тихомиров В.Г. Технология пивоваренного и безалкогольного производства / В.Г. Тихомиров.- М.: Колос, 1999. - 246 с.

3 Заяц Ю.А. Совершенствование технологических процессов в перерабатывающей промышленности / Ю.А. Заяц, А.Н. Прохоров, В.П. Яровой. - К.: Урожай, 1991. - 192 с.

4 Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум. За редакцією проф. І.Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2006. - 224 с.

5 Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев.- М.: Колос, 1999. - 551 с.

6 Горбатюк В.И. Процессы и аппараты пищевых производств / В.И. Горбатюк. М.: Колос, 1999. - 335 с.

7 Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств/ В.Н. Стабников, В.Д. Попов.- М.: Пищевая промышленность, 1978. - 660 с.

Додаток А  
(довідковий)

Таблиця А1 – Визначення масової долі двоокису вуглецю

Т, °С	Тиск, МПа																
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
0	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44	0,47	0,51	0,54	0,57	0,60	0,03	0,66	0,69	0,72	0,75	0,78	0,81
1	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,45	0,51	0,54	0,57	0,60	0,63	0,66	0,69	0,72	0,75	0,78	0,81
2	0,30	0,32	0,35	0,38	0,41	0,44	0,47	0,50	0,52	0,55	0,58	0,61	0,64	0,67	0,70	0,72	0,75
3	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,64	0,67	0,70	0,73
4	0,27	0,30	0,33	0,35	0,38	0,41	0,43	0,46	0,49	0,51	0,54	0,57	0,59	0,62	0,65	0,67	0,70
5	0,27	0,29	0,32	0,34	0,37	0,39	0,42	0,45	0,47	0,50	0,52	0,55	0,57	0,60	0,62	0,65	0,68
6	0,26	0,28	0,31	0,33	0,36	0,38	0,41	0,43	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,58	0,60	0,63	0,65
7	0,25	0,27	0,30	0,32	0,34	0,37	0,39	0,42	0,44	0,40	0,49	0,51	0,54	0,56	0,58	0,61	0,63
8		0,26	0,29	0,31	0,33	0,35	0,38	0,40	0,42	0,45	0,47	0,49	0,52	0,54	0,56	0,59	0,61
9		0,25	0,28	0,30	0,32	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,48	0,50	0,52	0,54	0,56	0,59
10			0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42	0,44	0,46	0,49	0,51	0,53	0,55
11			0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53
12				0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40	0,41	0,44	0,46	0,48	0,50	0,51
13				0,25	0,27	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,46	0,48	0,50
14					0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,48
15					0,26	0,27	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,40	0,41	0,43	0,45	0,47
16					0,25	0,26	0,28	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44	0,45
17						0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	0,37	0,39	0,41	0,43	0,44
18						0,25	0,27	0,28	0,30	0,32	0,33	0,35	0,36	0,38	0,40	0,41	0,43
19							0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,34	0,35	0,40	0,42

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ ХАРЧОВИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета роботи:** Дослідити процес сушіння на конвективній циркуляційній сушильній установці, виявити закономірності змінення вологості матеріалу і швидкості сушіння, визначити коефіцієнт сушіння процесу в першому і в другому періодах процесу.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути будову та принцип дії експериментальної установки для конвективного сушіння;
- розрахувати основні параметри процесу сушіння;
- провести експериментальні дослідження процесу сушіння зразка рослинної сировини;
- обробити статистично результати експерименту;
- побудувати графік залежності вологовмісту  $W_i$  від часу сушіння  $\tau_i$  (криву сушіння);
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

**- повторити:**

- 1) основні теоретичні положення процесу сушіння;
- 2) основні способи і обладнання, які застосовують для сушіння сировини та продукції харчових і переробних виробництв;
- 3) основні закономірності конвективного способу сушіння.

**- знати:**

- 1) область застосування процесів сушіння на переробних та харчових підприємствах;
- 2) місце сушильного обладнання у технологічних лініях переробних виробництв, загальну класифікацію і схеми сушарок;



- *вміти*: проводити налаштування експериментальної сушарки за умовами дослідів, користуватися контрольно-вимірювальними приладами, проводити визначення основних показників продукту за темою дослідження, будувати графічні залежності за результатами досліджень.

### 3 Загальні відомості про процес сушіння

Сушіння – це масообмінний процес видалення вологи з матеріалів за допомогою підведення до них теплової енергії конвекцією, теплопровідністю або випромінюванням.

У повітряній конвективній сушарці, яка є, як правило, камерною конструкцією, нагріте в калорифері до технологічно допустимої температури атмосферне повітря (сушильний агент) контактує з матеріалом, розміщеним на несучому пристрої.

Завдяки різниці температур матеріалу та повітря відбувається теплообмін між ними і, як результат, починається випаровування з поверхні матеріалу вільної або фізично-зв'язаної вологи. Різниця парціальних тисків водяної пари, яка виникає у прикордонному пароповітряному шарі матеріалу і в зовнішньому повітряному потоці, забезпечує рівномірне, певної тривалості, виділення зв'язаної вологи і незмінну швидкість цього процесу, тобто, постійну кількість вологи, що випаровується за одиницю часу з одиниці поверхні матеріалу.

Цей етап сушіння, коли швидкість процесу видалення вологи є незмінною, називається *першим періодом сушіння*, або *періодом постійної швидкості сушіння*, а сам процес – явище переміщення вологи (її маси) з поверхні матеріалу в повітряний потік – *зовнішньою дифузєю*. Тому перший період сушіння називають також *періодом зовнішньої дифузії*.

Протягом певного часу в першому періоді по мірі прогрівання матеріалу в глибину до температури, близької до температури сушильного агента, починається і поступово стабілізується процес переміщення вологи в напрямі від внутрішніх до зовнішніх шарів і далі до поверхні матеріалу. Завдяки отриманій різниці концентрацій вологи в глибинних та вже частково обезводнених зовнішніх шарах починається і розвивається процес внутрішньої дифузії, проте вже не вільної вологи, а так званої фізико-хімічної зв'язаної вологи.

Як тільки кількість води, яка знаходиться на поверхні матеріалу, стає меншою, ніж та кількість води, яка може випаровуватися, швидкість сушіння починає зменшуватися.

Початок зниження швидкості сушіння характеризується так званим *першим критичним вологовмістом матеріалу*  $W_{к1}$ . Наступний період – *період падіння швидкості сушіння* (період внутрішньої дифузії води). Цей період продовжується до тих пір, поки матеріал не досягне *другого критичного вологовмісту матеріалу*  $W_{к2}$ , який називається рівноважним вологовмістом.

Досягнувши значення  $W_{к2}$  кількість виділеної води з матеріалу і навколишнього середовища (повітря) та кількість води, яка повернеться з повітря у матеріал (за одиницю часу) стають майже рівними. У цьому випадку процес сушіння стає неможливим і, як правило, його припиняють.

Якщо досягнутий вологовміст  $W_{к2}$  менший, ніж технологічно необхідний кінцевий вологовміст матеріалу  $W_2$ , відновлюють рушійні сили зовнішні ( $\Delta P$ ) і внутрішні ( $\Delta C$ ) дифузії води за рахунок під-

вищення температури сушильного агента (якщо це технологічно допустимо, зниження його вологовмісту або загального тиску в сушарці).

Характер змінення вологовмісту матеріалу  $W_i$  під час його сушіння представляється кривою сушіння, графік якої будують за експериментальними даними (рисунк 1).

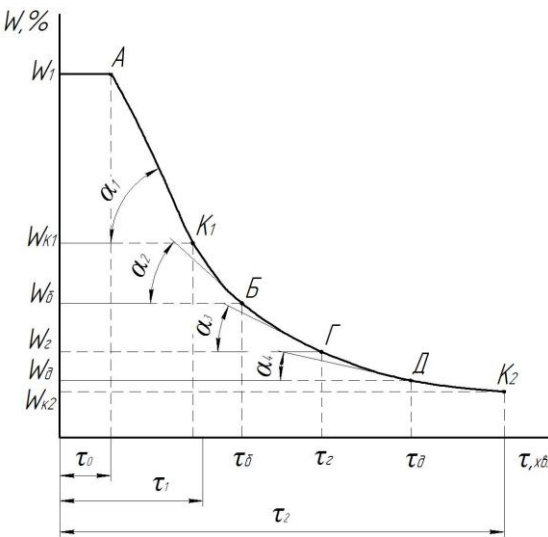


Рисунок 1 – Експериментальна крива сушіння

З рисунка видно, що після досить невеликого проміжку часу  $\tau_0$  – періоду підігріву поверхні матеріалу, коли тільки починає енергійно розвиватися зовнішня дифузія вологи, а вологовміст матеріалу зменшується дуже поволі, настає період постійної швидкості сушіння (період зовнішньої дифузії) тривалістю  $\tau_1$ . У цьому періоді вологовміст матеріалу зменшується за лінійним законом до досягнення  $W_{k1}$  (критичної точки  $K$ ), після якого починається період внутрішньої дифузії (другий період); вологовміст матеріалу за період часу  $\tau_2$  зменшується по кривій  $AD$  і досягає рівномірного вологовмісту  $W_{k2}$  (або необхідного вологовмісту  $W_2$ ).

Для кожного з двох періодів швидкість процесу сушіння характеризується зменшенням вологи в матеріалі  $dW_i$  за нескінченно малий період часу  $d\tau_i$ , %/с.

Таким чином, швидкість процесу сушіння  $u_i$ , %/с:

$$u_i = \frac{dW_i}{d\tau_i} \quad (1)$$

де  $W_i$  - вологовміст у матеріалі %;  $\tau_i$  - тривалість сушіння, с.

Якщо у першому періоді швидкість процесу обумовлюється температурою і швидкістю руху сушильного агента в сушильній камері, то в другому періоді швидкість процесу залежить від кількості масового співвідношення різних форм фізико-хімічно зв'язаної вологи, від дії термодифузії.

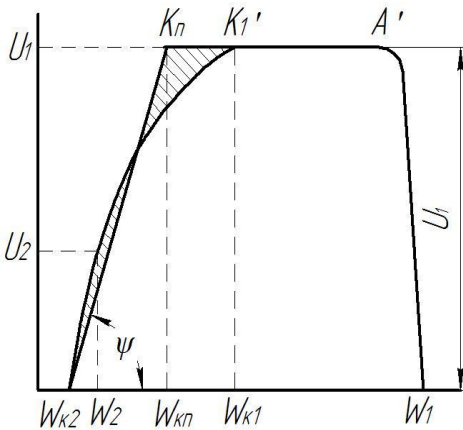
Швидкість процесу сушіння у кожному з двох періодів визначають графічним диференціюванням кривої сушіння.

На графіку кривої сушіння з різних її точок, вибраних довільно (наприклад, з рівним кроком по ординаті  $W_i$ ), проводять дотичні лінії і визначають тангенси кутів нахилу цих дотичних і кривою, значення яких і стає значенням швидкості процесу у вибраних точках.

$$u_i = \frac{dW_i}{d\tau_i} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2)$$

де  $i$  - номер вибраної точки.

Якщо на міліметрівці відкласти на осі абсцис значення вологості



матеріалу  $W_i$ , а на осі ординат відповідну ним швидкість сушіння (у заздалегідь вибраних масштабах), то з'єднавши точки перетину відповідних значень абсцис і ординат, отримаємо графік змінення швидкості процесу сушіння, або криву швидкості сушіння (рисунок 2).

$$u_i = \frac{dW_i}{d\tau_i} = f(W_i).$$

Рисунок 2 — Експериментальна крива швидкості сушіння

При такому зображенні кривої швидкості процесу сушіння дослідник має можливість проаналізувати фізичне значення характеру графіка, тому що знак і ступінь крутизни графіка залежать від структури матеріалу, від наявності (відсутності) або співвідношення маси вологи різних форм зв'язку її з матеріалом.

Тривалість сушіння, яка характеризує енергетичну ефективність процесу, для першого періоду визначається за формулою, хв.:

$$\tau_1 = (W_1 - W_{k1}) / u_1 \quad (3)$$

де  $W_1$  і  $W_{k1}$  - відповідно, початковий і перший критичний вологовміст матеріалу в %;

$u_1$  - швидкість сушіння у першому періоді, %/хв.

Тривалість сушіння у другому періоді, хв.:

$$\tau_2 = \frac{W_{kn} - W_{k2}}{u_1} \cdot \ln \frac{W_{kn} - W_{k2}}{W_2 - W_{k2}}, \quad (4)$$

де  $W_2$  - заданий (отриманий) кінцевий вологовміст матеріалу, %;

$W_{kn}$  - приведений критичний вологовміст матеріалу, %.

Значення приведеного критичного вологовмісту  $W_{kn}$  отримують, замінивши криву швидкості другого періоду (рисунок 2) прямою так, щоб вона відсікла рівні площі з обох сторін кривої. Отримана на графіку точка  $K_n$  відповідає приведеному критичному вологоутриманню  $W_{kn}$ .

**Тангенс кута  $\psi$  нахилу прямої  $W_{k2} - K_n$ ,  $\text{хв.}^{-1}$  визначається за наступним виразом:**

$$\text{tg } \psi = \frac{u_1}{W_{kn} - W_{k2}} = K. \quad (5)$$

Він називається коефіцієнтом швидкості сушіння у другому періоді і характеризує інтенсивність масообміну під час сушіння.

Величина  $W_{k2}$  – рівноважний (отриманий або відомий) вологовміст матеріалу, %. Значення рівноважного вологовмісту  $W_{k2}$  для різних матеріалів визначають експериментальним шляхом. Як приклад, у таблиці 1 приведені значення  $W_{k2}$  для різних матеріалів залежно від відносної вологості сушильного агента – повітря  $\psi$  на вході в сушарку. Величина  $\psi$  визначається за допомогою психрометричних таблиць.

Таблиця 1 – Рівноважний вологовміст рослинних матеріалів у залежності від відносної вологості сушильного агента

Матеріал	Відносна вологість сушильного агента – повітря, %									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Картопля	5,6	7,2	8,4	9,4	10,6	11,7	13,2	15,7	20,0	42,3
Буряк	6,5	7,8	10,3	11,0	11,3	15,4	19,7	28,7	60,0	–
Морква	2,4	3,7	6,0	8,3	14,0	17,7	22,8	30,5	47,0	–
Яблука	2,43	3,4	4,8	6,4	10,2	14,3	18,7	24,2	27,6	–

При розрахунку початкового вологовмісту  $W_1$  матеріалу використовують експериментальні значення вмісту сухої речовини (таблиця 2).

Таблиця 2 – Вміст сухої речовини і допустима температура нагріву деяких рослинних матеріалів.

Матеріал	Вміст сухої речовини, %	Допустима температура нагрівання, °С
Картопля	15,20	95 / 65
Буряк столовий	20,00	90 / 70
Морква	10,15	100 / 70
Яблука	10,15	60 / 70
Хліб пшеничний	53,55	60 / 120

*Примітка:* допустима температура на початок сушіння – чисельник, на кінець сушіння – знаменник

#### **4 Експериментальна лабораторна сушильна установка**

Конвективна сушильна установка, схема якої показана на рисунку 3, складається з сушильної камери 2, яка є металевим циліндром діаметром 200мм. Установка змонтована на основі 1. Камера має прозору кришку 4. З правої сторони до сушильної камери приєднаний калорифер 8, що складається з вентилятора 9 і електричної спіралі 10. Ліву частину сушильної камери з'єднано з калорифером гофрованою трубою 7 діаметром 80мм.

Посередині труби поставлена засувка 6 для регулювання витрати повітря і швидкості його руху.

У сушильній камері консольно закріплена гнучка пластина 13, на яку наклеєні тензометричні датчики 14, які замірюють деформацію згину пластини 13.

На пластину встановлюється кошик 3 з матеріалом, що підлягає сушінню. По мірі висихання матеріалу пластина розгинається і тензометричні датчики фіксують її деформацію (змінення маси матеріалу внаслідок випаровування вологи) і подають сигнал на контрольний прилад, за яким визначається змінення маси матеріалу.

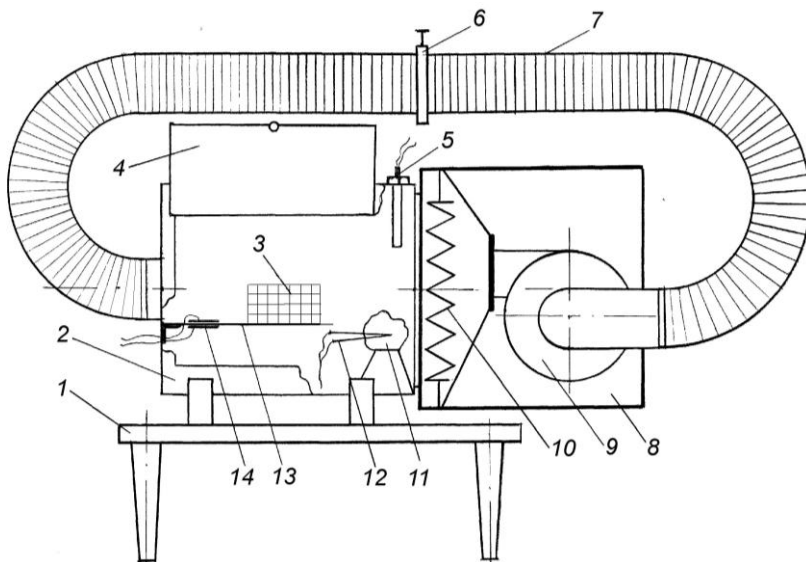


Рисунок 3 – Експериментальна конвективна сушильна установка  
 1 - основа; 2 - сушильна камера; 3 - сітка для матеріалу; 4 - кришка сушильної камери; 5 - датчик температури; 6 - заслінка; 7 - гофрована труба; 8 - калорифер; 9 - вентилятор; 10 - нагрівальна спіраль; 11 - дослідний матеріал; 12 - термопара; 13 - гнучка пластина; 14 - тензOMETричні датчики.



Рисунок 4 – Фото загального вигляду сушильної установки

## 5 Порядок виконання експериментальної частини роботи

1 Увімкнути вентилятор і калорифер, відкрити заслінку 6 і протягом 10...15 хв. прогріти установку. Під час прогріву спостерігати за температурою  $t_1$  на приладі 2ТРМ1.

2 Подрібнити на тонку стружку (завтовшки 2...4 мм у кількості 100 г) матеріал, що досліджується.

3 Вимкнути калорифер і вентилятор, завантажити подрібнений матеріал у сітку і помістити сітку з матеріалом на тензометричну пластину в порожнині сушильної камери. Щільно закрити кришку сушильної камери.

4 Записати в протокол дослідів час початку сушіння і зразу ж увімкнути вентилятор та калорифер.

5 Реєструвати змінення маси матеріалу під час сушіння за допомогою тензометричних датчиків і контрольних приладів. Поточні дані досліджуваного матеріалу заносити в таблицю 3. Для цього протягом перших 15 хвилин сушіння фіксуються змінення маси матеріалу через кожні 2 хвилини. Після 15 хвилин сушіння дані фіксуються через кожні 5 хвилин.

6 Досліди продовжувати доти, поки два останні показники змінення маси матеріалу не змінюватимуться, тобто матеріал досяг рівноважного вологовмісту.

Таблиця 3 – Експериментальні і розрахункові дані процесу сушіння

Номер спостереження	Час спостереження, хв.	Показання вагового пристрою, г	Маса вологи в матеріалі, г	Вологовміст матеріалу по відношенню до сухої речовини, %	Швидкість процесу сушіння, %/хв
1	2	3	4	5	6

*Примітка:* графи 1...3 для експериментальних даних, графи 4...6 для розрахункових даних.

7 Послідовно вимкнути калорифер 3 і вентилятор 2, вийняти з камери сітку з матеріалом і зовнішньою експертизою оцінити стан висушеного матеріалу.



## 6 Вимоги безпеки

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## 7 Обробка результатів експерименту

Визначити поточну масу вологи у матеріалі до початку  $i$  у ході сушіння, г:

$$M_{ei} = M_i - M_{cp} \quad (5)$$

де  $M_{ei}$  - маса вологи в матеріалі в  $i$ -й проміжок часу;

$M_i$  - маса матеріалу на  $i$ -й проміжок часу експерименту;

$M_{cp}$  - постійна для всього експерименту маса сухої речовини, г.

$$M_{cp} = \frac{M_0 \cdot X_{cp}}{100}, \quad (6)$$

де  $X_{cp}$  - вміст сухої речовини в матеріалі, %;

$M_0$  - маса матеріалу до сушіння, г.

Значення  $X_{cp}$  визначається за таблицею 2 або за довідником.

Послідовно, згідно з номером досліду за допомогою рівняння (5) розрахувати величини  $M_{ei}$  і занести у графу 4 таблиці 3.

Визначити вологовміст матеріалу на  $i$ -й проміжок часу спостереження за процесом сушіння %:

$$W_i = \frac{M_{ei}}{M_{cp}} \cdot 100 \quad (7)$$

Послідовно, згідно з номером досліду за допомогою рівняння (7) розрахувати величини  $W_i$  і занести їх у графу 5 таблиці 3.

Побудувати графік залежності вологовмісту  $W_i$  матеріалу від тривалості  $\tau_i$  сушіння (криву сушіння)  $W_i = f(\tau_i)$ . Для цього на міліметровому папері у прийнятому масштабі знаходять точки перетину відповідних значень  $W_i$  і  $\tau_i$  згідно з номерами дослідів (графи 2 і 5 таблиці 3; приклад на рисунку 1).

За допомогою лекала накреслити відрізок початку кривої – до точки *A*. Далі від точки *A* проводиться усереднена похила пряма лінія до першої критичної точки *K<sub>1</sub>* – точки дотику цієї прямої і наступної кривої сушіння другого періоду. На осі ординат відзначається вологовміст *W<sub>k1</sub>*, який відповідає точці *K<sub>1</sub>*.

Нарешті за допомогою лекала, усереднюючи точки (*B, B, Г, Д, K<sub>2</sub>*), що залишилися, проводять криву сушіння для другого періоду в межах відрізка *τ<sub>1</sub>, τ<sub>2</sub>*. Знаходять другу критичну точку *K<sub>2</sub>*, якій на осі ординат відповідає рівноважний вологовміст матеріалу *W<sub>k2</sub>*, або, якщо значення *W<sub>k2</sub>* не досягнуте, знаходять кінцеву точку *Д* кривої сушіння, якій відповідає фактично досягнутий кінцевий вологовміст *W<sub>2</sub>* матеріалу.

Під горизонтальною точкою *τ<sub>1</sub>* на графіку відзначаються періоди сушіння матеріалу підігріву (*τ<sub>0</sub>*), першого періоду (*τ<sub>1</sub>*) і другого періоду (*τ<sub>2</sub>*) сушіння. На графіку перевіряється наявність усіх умовних позначень і одиниць вимірювань.

Побудувати графік залежності швидкості сушіння від вологовмісту матеріалу

$$\frac{dW_i}{d\tau_i} = f(W_i) \text{ (див. рисунок 2).}$$

Для цього спочатку слід виконати графічне диференціювання кривої сушіння. На графіку *W<sub>i</sub> = f(τ<sub>i</sub>)* (рисунок 1) вибирається кілька точок; для першого періоду в межах *W<sub>1</sub> ≤ W<sub>i</sub> ≤ W<sub>k1</sub>* достатньо однієї точки.

Тоді швидкість сушіння у першому періоді % / хв.:

$$u_i = \frac{dW_i}{d\tau_i} = \operatorname{tg} \alpha \alpha_i = \frac{W_1 - W_{k1}}{\tau_i} \quad (8)$$

Для другого періоду потрібно вибирати точки *B, Г, B, Д* або *K<sub>2</sub>*. Далі з вибраних точок проводяться дотичні до кривої сушіння і визначається кут їх нахилу *α* за допомогою транспортира. За значенням *α* знаходяться тангенси їх нахилу до осі *τ<sub>i</sub>*.

Визначення тангенсів можна виконати розрахунковим шляхом. Наприклад, для точки  $B$   $tg\delta = ab/eb$ , причому  $ab = (W_a - W_e)$  (%) і  $eb = \tau_B$  (хв)., тобто відношення протилежного катета трикутника до прилеглого прирівнюється до відношення різниці вологовмісту до різниці часу для відповідних точок  $a, b, e$  і вимірюється у %/хв.

Значення розрахованих тангенсів  $tg\alpha = f(W_i) = dW_i/d\tau_i$  відкладаються послідовно у прийнятому масштабі на координатну сітку графіка  $dW_i/d\tau_i = f(W_i)$  і заносяться у таблицю 3 стовпчик 6.

Графік викреслюється на міліметровому папері за допомогою лінійки і лекала. Отриманий відрізок  $tg\alpha = (W_a - W_e)/\tau_B$  (%/хв) слід помножити на прийнятий масштаб  $M_i$  (мм·хв/%) і значення  $tg\alpha \delta$  (мм). Відкладається це значення на графіку  $U_i = f(W_i)$  від точки  $W_B$  (від осі  $W_i$ ) вгору і одержується точка  $B$ .

Аналогічно визначаються тангенси дотичних у точках  $B, \Gamma, Д$  або  $K_2$ ; їх розміри в мм наносяться на графік  $U_i = f(W_i)$  і отримуються відповідні точки  $B', \Gamma', Д'$  або  $K'_2$ .

Відрізок  $A'K'_1$  відповідає швидкості сушіння в першому періоді і має горизонтальне розміщення, що указує на постійність швидкості сушіння у першому періоді.

Відрізок  $K'_1Д'$  (або  $K'_1 K'_2$ ) характеризує падаючу швидкість сушіння у другому періоді в межах  $W_{к1} W_\delta$  або  $W_{к1} W_{к2}$ .

Визначається приведений критичний вологовміст  $W_{кп}$ . Для цього на графіку 2 проводиться з точки  $W_{к2}$  (або  $W_2$ ) пряма  $W_{к2}K_n$  (або  $W_2K_n$  так, щоб площі над і під кривою швидкості сушіння у другому періоді відносно цієї прямої були рівними. Вологовміст, який відповідає отриманій точці  $K_n$ , і буде значенням  $W_{кп}$ .

Визначається коефіцієнт сушіння  $K$  для другого періоду процесу за рівнянням (6).

Розраховується тривалість першого ( $\tau_1^p$ ) і другого ( $\tau_2^p$ ) періодів сушіння за рівняннями (3) і (4).

Порівнюються розрахункові значення  $\tau_1^p$  і  $\tau_2^p$  з їх експериментальними значеннями  $\tau_1$  і  $\tau_2$ , узятими з графіка (1).

Визначається відносна помилка розрахунку часу сушіння % для першого періоду і другого періоду

$$\delta_1 = \left( \frac{\tau_1 - \tau_1^p}{\tau_1} \right) \cdot 100 \qquad \delta_2 = \left( \frac{\tau_2 - \tau_2^p}{\tau_2} \right) \cdot 100 .$$

За одержаними результатами роботи формулюються висновки по роботі і складається звіт згідно з загальними вимогами.

### **7 Контрольні питання**

- 1 На що витрачається теплота при конвективному сушінні?
- 2 Чому розглянутий спосіб сушіння називається конвективним, а сушіння – циркуляційним?
- 3 Які види сушіння та конструкції сушарок вам відомі?
- 4 З якою метою частина або все відпрацьоване повітря направляють з сушильної камери знову до вентилятора і калорифера?
- 5 Які параметри характеризують стан сушильного агента – повітря?
- 6 У чому головна відмінність між поняттями „вологість“ і „вологівміст“ матеріалу?
- 7 Яким чином процес сушіння поділяють на два періоди? Чим відрізняються механізми і рушійні сили процесу сушіння у першому і у другому періодах?
- 8 Опишіть порядок побудови графіка змінення швидкості сушіння.
- 9 Як будується графік залежності вологовмісту матеріалу від тривалості сушіння і які його складові?
- 10 Яка мета побудови кривих сушіння та швидкості сушіння? Значення цих кривих для практики.

## 8 Тестові завдання

1) До якого виду сушіння можна віднести формулювання „Безпосередній контакт матеріалу, що висушується з сушильним агентом (повітря, топкові гази і т.п.)?

1 контактного;            2 конвективного;            3 сублимаційного.

2) Який вид води не видаляється з матеріалу при сушінні?

1 фізико-хімічно зв'язана вода;            2 хімічно зв'язана вода;  
3 фізико-механічно зв'язана вода;

3) Який період сушіння характеризується більшим значенням швидкості сушіння?

1 перший;            2 другий;            3 швидкості рівні.

4) Як змінюється швидкість сушіння у перший період процесу?

1 зменшується;            2 збільшується;            3 є постійною.

5) Яку залежність демонструє крива сушіння?

1 залежність змінення вологовмісту продукту від температури сушильного агента;

2 залежність змінення середньої (інтегральної) вологості від часу сушіння;

3 залежність змінення середньої (інтегральної) вологості від температури продукту, який висушується.

6) Укажіть, у яких координатах звичайно будується крива швидкості сушіння.

1 вісь абсцис – *вологість*, вісь ординат – *швидкість сушіння*;

2 вісь абсцис – *температура*, вісь ординат – *швидкість сушіння*;

3 вісь абсцис – *час*, вісь ординат – *швидкість сушіння*;

**7) У якому напрямі проходить переміщення вологи при реалізації процесу сушіння?**

- 1 з внутрішніх шарів до поверхневих шарів продукту;
- 2 з поверхневих шарів до внутрішніх шарів продукту;
- 3 при сушінні волога по шарах продукту не переміщується.

**8) Який період процесу сушіння називають періодом зовнішньої дифузії?**

- 1 перший період;
- 2 другий період;
- 3 третій період.

**9) Як називають відношення маси вологи до загальної маси сухої речовини вологого матеріалу?**

- 1 вологовміст;
- 2 вологість;
- 3 обидва терміни рівноцінні.

**10) Яке явище називають першим критичним вологовмістом матеріалу  $W_{к1}$ ?**

- 1 початок зниження швидкості сушіння;
- 2 початок збільшення швидкості сушіння;
- 3 досягнення нульової швидкості сушіння.

### **Література**

1 Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. – Учебник. / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. М.: „Колос“, 1999. - 551 с.

2 Горбатюк В.И. Процессы и аппараты пищевых производств. / В.И. Горбатюк. М.: „Колос“, 1999. - 335 с.

3 Процеси і апарати харчових виробництв. Під ред. І.Ф. Малержика. - Мін.освіти України, К.: 1997. - 276 с.

4 Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств. / В.Н. Стабников. М.: Пищевая промышленность, 1976. - 663 с.

5 Лебедев П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. / П.Д. Лебедев, А.А.Щукин М.: Энергия, 1970. - 408 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВАКУУМНОГО СУШІННЯ ОВОЧІВ ТА ФРУКТІВ

**Мета роботи:** Дослідити процес сушіння на вакуумній сушильній установці, виявити закономірності змінення вологості матеріалу і швидкості сушіння від тривалості процесу.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути будову та принцип дії експериментальної установки для вакуумного сушіння;
- розрахувати основні параметри процесу сушіння;
- провести експериментальні дослідження процесу сушіння зразка рослинної сировини;
- обробити статистично результати експерименту;
- побудувати графіки залежностей вологовмісту від часу сушіння (криву сушіння) і швидкості сушіння від вологовмісту;
- сформулювати висновки за результатами роботи.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

**- повторити:**

- 1) основні теоретичні положення процесу сушіння;
- 2) основні способи і обладнання, які застосовують для сушіння сировини та продукції харчових і переробних виробництв;
- 3) основні закономірності вакуумного способу сушіння.

**- знати:**

1) область застосування процесів сушіння на переробних та харчових підприємствах; 2) місце вакуумного сушильного обладнання у технологічних лініях переробних виробництв, класифікацію і схеми сушарок;

**- вміти:** проводити налаштування експериментальної сушарки, користуватися контрольно-вимірювальними приладами, проводити визначення основних показників продукту, будувати графічні залежності за результатами досліджень.

### 3 Загальні відомості про процес сушіння

Сушіння – видалення вологи з твердих і пластичних матеріалів шляхом її випаровування; при цьому волога з твердих або пластичних матеріалів переходить у парову або газову фазу.

Багато видів сировини харчових виробництв містять значну кількість вологи. Однак готові продукти повинні містити мінімальну кількість вологи, що дозволяє здешевити їх транспортування, збільшити ступінь збереження і надати їм необхідні властивості. Тому процес видалення вологи знаходить застосування майже на всіх переробних і харчових підприємствах.

Вологу можна видалити з матеріалів різними способами:

1) Механічними способами (віджимання, відстоювання, фільтрування, центрифугування).

2) Сушінням – видаленням вологи з матеріалу випаровуванням.

3) Фізико-хімічними, які використовуються у лабораторній практиці (зневоднення над сірчаною кислотою або над хлористим кальцієм в ексикаторах).

Найбільш повне видалення вологи досягається за допомогою теплового сушіння.

У цукробуряковому виробництві сушінню піддаються цукор-пісок, цукор-рафінад, а також відходи виробництва – жом; у пивоварному виробництві: сушать солод, відходи виробництва.

Сушіння використовується при отриманні сухого молока, сухарів, фруктів, овочів, макаронних виробів, пастили і т.п.

За своєю фізичною суттю сушіння є складним дифузійним процесом, швидкість якого визначається швидкістю дифузії вологи з глибини тіла, що висушується, у навколишнє середовище. Видалення вологи при сушінні зводиться до переміщення тепла і речовини.

Вологовміст матеріалу виражають за відношенням кількості вологи, що *втримується* у ньому,  $G_{вол}$  до загальної кількості вологого матеріалу  $G_{вм}$  або до кількості абсолютно сухої речовини, що *перебуває* у вологому матеріалі,  $G_c$ .



Тобто

$$W = \frac{G_{\text{вол}}}{G_{\text{в.м}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

$$W = \frac{G_{\text{вол}}}{G_c} \cdot 100\% \quad (2)$$

Вологість матеріалу звичайно виражають у відсотках, але за змістом вона виражається як [кг вологи/кг вологої речовини] або [кг вологи/кг сухої речовини].

Рушійною силою процесу сушіння є різниця парціальних тисків парів вологи над поверхнею матеріалу  $p_m$  і в повітрі  $p_n$ .

$$\Delta p = p_m - p_n. \quad (3)$$

У процесі сушіння величина  $p_m$  зменшується і наближається до межі  $p_m = p_n$ . При досягненні цієї межі настає стан динамічної рівноваги, при якому кількість вологи, що йде з матеріалу, що висушується, у повітря, дорівнює кількості вологи, що надходить у зворотному напрямку. Вологість матеріалу, відповідна до динамічної рівноваги, називається рівноважною вологістю  $W_p$ .

Рівноважна вологість залежить від парціального тиску водяної пари в повітрі  $p_n$  або пропорційної їй величини відносної вологості повітря  $\varphi$  і визначається експериментально.

Залежність  $W_p = f(\varphi)$ , обумовлена при постійній температурі і постійному тиску вологого повітря, називається ізотермою десорбції. Типові ізотерми десорбції зображено на рисунку 1.

З рисунка видно, що чим вища температура повітря (при  $p = \text{const}$ ) і нижче його тиск (при  $t = \text{const}$ ), тим нижча рівноважна вологість матеріалу (при  $\varphi = \text{const}$ ).

Отже, для збільшення ступеня сушіння матеріалу необхідно підвищувати температуру, або ж понижувати тиск повітря, що оточує вологий матеріал.

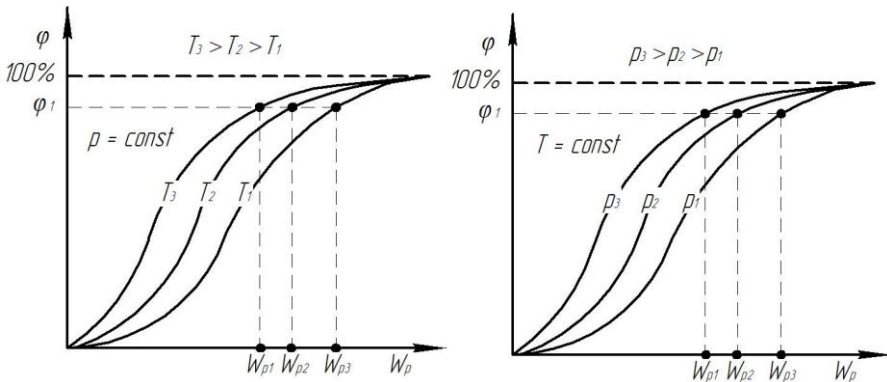


Рисунок 1 – Ізотерми десорбції:

а) при постійному тиску повітря; б) при постійній температурі повітря

Очевидно, що спільне застосування цих способів дасть найбільший ефект, що й використовується у радіаційних вакуумних сушарках.

Механізм процесу сушіння у значній мірі визначається формою зв'язку вологи з матеріалом: чим міцніший цей зв'язок, тим трудніше протікає процес сушіння.

З погляду на сушіння розрізняють вільну і зв'язану вологу. Під вільною розуміють вологу, швидкість випару якої з матеріалу дорівнює швидкості випару води з вільної поверхні. При випарі вільної вологи  $p_n = p_m$ , де  $p_n$  - тиск насиченої пари води над її вільною поверхнею. Під зв'язаною розуміють вологу, швидкість випару якої з матеріалу менша за швидкість випару води з вільної поверхні.

Користуючись ізотермою десорбції, розглянемо зміну вологості матеріалу в процесі сушіння (рисунок 2). При зміні вологості від  $W_1$  до  $W$  матеріал містить вільну вологу (при цьому  $p_n = p_m$ ) і перебуває у вологому стані. При зміні вологості від  $W$  до нуля матеріал містить зв'язану вологу (при цьому  $p_n < p_m$ ) і перебуває у гігроскопічному стані. Точка „а“ називається гігроскопічною точкою, а відповідна їй вологість  $W$  гігроскопічною вологістю. Зоні вологого стану матеріалу відповідає відносна вологість повітря  $\varphi = 100\%$ , при цьому  $p_n = p_m$ .

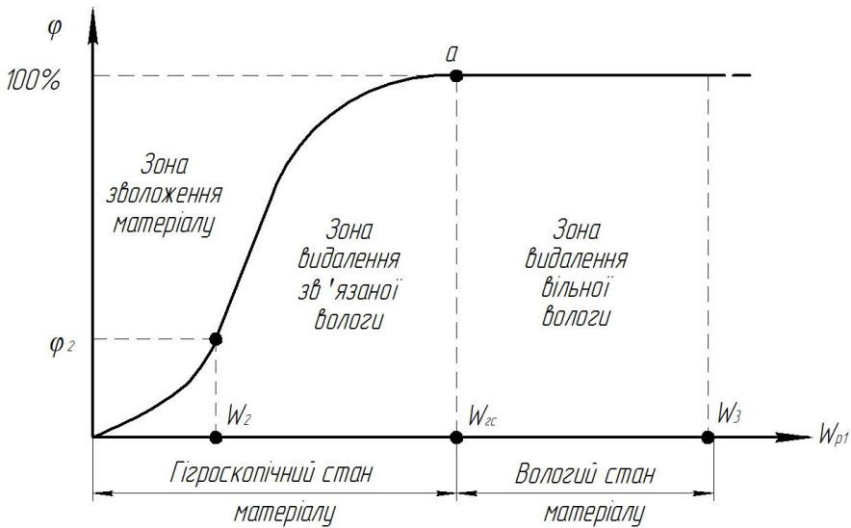


Рисунок 2 – Змінення вологості матеріалу в процесі сушіння

Гігроскопічна вологість  $W_{zc}$  перебуває на межі вільної і зв'язаної вологи в матеріалі. Вільна волога буде видалятися з матеріалу при будь-якій відносній вологості повітря, меншій, ніж  $100\%$ . Видалення зв'язаної вологи можливе лише при тій відносній вологості повітря, яка відповідає рівноважній вологості матеріалу, меншій, ніж його дійсна вологість. Наприклад, якщо дійсна вологість матеріалу, що перебуває в гігроскопічному стані, рівна  $W_2$ , то матеріал буде сушитися, коли відносна вологість повітря  $\varphi < \varphi_2$ , а при  $\varphi > \varphi_2$  можливе тільки зволоження матеріалу (сорбція вологи матеріалом).

Як відомо, основними графічними показниками процесу сушіння є крива сушіння, яка описує характер змінення вологовмісту  $W_i$  матеріалу під час його сушіння і будується за експериментальними даними (рисунок 3 а), та експериментальна крива швидкості сушіння (рисунок 3 б) \*.

\* **Примітка:** Характеристика та порядок побудови вказаних кривих викладені у попередній лабораторній роботі „Експериментальне дослідження процесу конвективного сушіння харчових матеріалів“ (даний посібник с. 224) і тому для виконання цієї роботи слід скористатися наведеними даними.

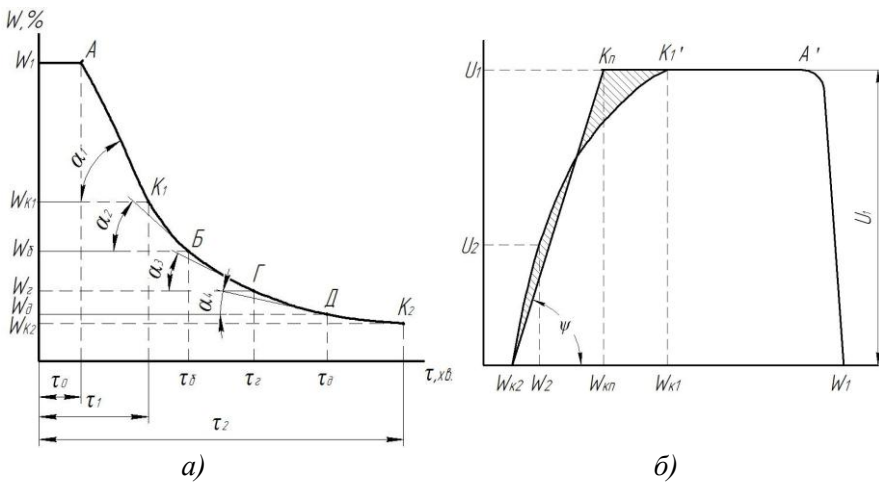


Рисунок 3 – Графічні показники процесу сушіння:  
 а) крива сушіння; б) крива швидкості сушіння.

Слід відмітити, що вид кривої сушіння, а, отже, і кривої швидкості сушіння залежить від форми часток матеріалу, що висушується, від його структури, від виду зв'язку вологи з матеріалом і в кожному конкретному

випадку може відрізнятися від зображених на рисунку 3.

Особливо великою різноманітністю форм відрізняються ділянки кривих у другому періоді сушіння. На рисунку 4 зображені типові криві швидкості сушіння для деяких матеріалів.

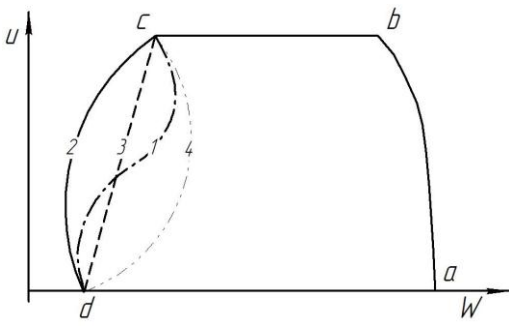


Рисунок 4 – Різноманітність ділянок кривої швидкості сушіння

Крива 1 характерна для капілярно-пористих матеріалів, лінії 2 і 3 характерні для тонколистових матеріалів з великою поверхнею випару (папір, тканина і т.д.), крива 4 – для керамічних виробів. Точка перегину відповідно до вологості може бути виражена нечітко.

#### 4 Експериментальна лабораторна сушильна установка

Лабораторна вакуумна сушильна установка показана на рисунку 5.

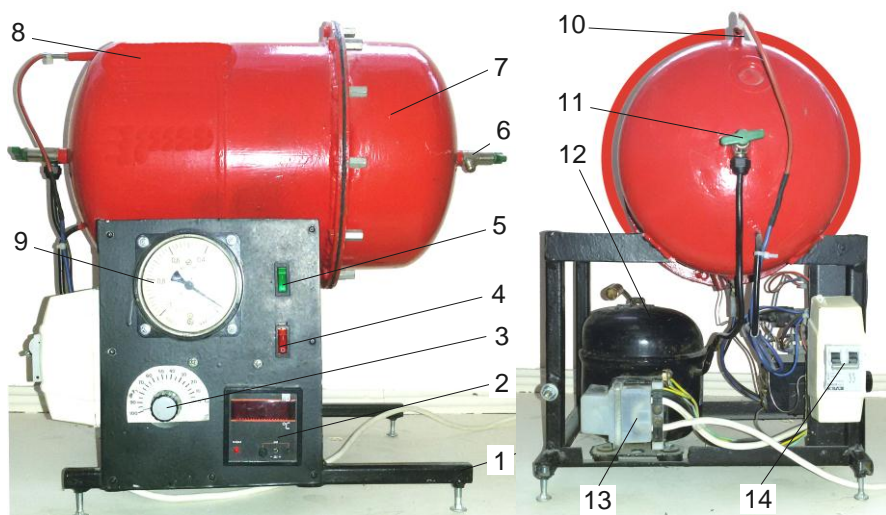


Рисунок 5 – Загальний вигляд лабораторної вакуумної сушарки:

1 - рама; 2 - показчик дистанційного термометра; 3 - терморегулятор ТЕНа; 4 - вмикач нагрівача; 5 - вмикач вакуум-насоса; 6 - вентиль скиду вакууму; 7 - кришка сушильної камери; 8 - сушильна камера; 9 - вакуумметр; 10 - вхід термопари термометра; 11 - вентиль вакуумного трубопроводу; 12 - вакуумний насос; 13 - електрообладнання; 14 – вимикач-автомат.

Вакуумна сушарка складається з циліндричної сушильної камери 8, оснащеної від'ємною кришкою 7, які закріплені на рамі 1. І камера, і кришка мають еліптичні днища.

Герметизація стику камери і кришки здійснюється гвинтовим фланцевим з'єднанням з гумовою прокладкою (12 різьбових шпильок та спеціальні ковпачкові гайки).

На основі рами 1 встановлений вакуумний насос 12, під'єднаний до камери трубопроводом з вентилем 11.

При необхідності скидання вакууму (з'єднання порожнини сушильної камери з атмосферою) здійснюється вентилем скиду вакууму 6.

Електрообладнання установки об'єднане в окремому блоці 13, захист здійснює вимикач-автомат 14.



Рисунок 6 – Прилад 2TRM1

Вхід шнура термопары приладу 2TRM1 у робочу камеру сушарки (поз. 10 рисунка 5) оснащений ущільнювачем, який забезпечує герметичність вакуумної камери.

Розрідження (глибина вакууму в сушильній камері) вимірюється вакуумметром, під'єднаним до трійника в системі трубопроводу від вакуумного насоса 12 до сушильної камери.

Регулювання ступеню розрідження у сушильній камері здійснюється тривалістю роботи вакуум-насоса. Насос вмикається і вимикається вручну вмикачем 5.

Пульт керування лабораторною вакуумною сушаркою включає показчик температури в порожнині камери 2, регулятор температури, під'єднаний до ТЕНа, вмикач нагрівача 4, вмикач вакуум-насоса 5 та стрілочний вакуумметр 9.

У порожнині камери розташований предметний стіл, обладнаний ваговимірним пристроєм тензOMETричного типу, під яким кріпиться термоелектричний нагрівач (ТЕН) повітряного типу. Електрична схема керування ТЕНом дає змогу плавно змінювати температуру в сушильній камері.

Вимірювання температури матеріалу в процесі його сушіння здійснюється приладом 2TRM1 оснащеним термопарою (рисунок 6).

## 5 Методика виконання експерименту

1 Підготувати об'єкт дослідження. У залежності від програми досліджень овочі і фрукти можуть висушуватися цілими або подрібненими (на тонку стружку, кружечками, скибочками, тощо). Зважити вихідний матеріал (100...200 г), вкласти в металевий сітчастий кошик.

2 Зняти кришку сушильної камери, завантажити підготований кошик з матеріалом на тензометричну пластину столу сушильної камери. Закрити кришку камери і затягнути гайки фланцевого з'єднання.

3 Відмітити в протоколі дослідів час початку сушіння, увімкнути вакуум-насос та електронагрівач.

4 Зафіксувати момент встановлення у порожнині камери потрібної температури середовища і ступеню розрідження, тобто досягнення сталого режиму процесу сушіння.

5 Протягом перших 15 хвилин сталого процесу сушіння фіксувати змінення маси матеріалу через кожні 1...2 хвилини. Після 15 хвилин сушіння збільшити період фіксування через кожні 3...5 хвилин. Записи проводити у формі таблиці 1.

6 Продовжити досліді, поки два останні показники маси матеріалу будуть незмінними, тобто, до моменту досягнення рівноважного вологовмісту.

Таблиця 1 – Експериментальні і розрахункові дані процесу сушіння

Номер спостереження	Час спостереження, хв.	Показання вагового пристрою, г	Маса вологи в матеріалі, г	Вологовміст матеріалу по відношенню до сухої речовини, %	Швидкість процесу сушіння, %/хв
1	2	3	4	5	6

*Примітка:* стовпці 1...3 для експериментальних даних, стовпці 4...6 для розрахункових даних.

7 Вимкнути нагрівач і вакуум-насос, вийняти з камери сітку з матеріалом і оцінити стан і якість висушеного матеріалу.

## **6 Вимоги безпеки**

Під час проведення роботи додержуватись правил загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“. При розвантажуванні сушарки після експерименту не торкатись гарячих металевих частин.

## **7 Обробка результатів експерименту**

Методика обробки результатів експерименту та порядок побудови кривої сушіння і кривої швидкості сушіння викладені у попередній лабораторній роботі „Експериментальне дослідження процесу конвективного сушіння харчових матеріалів“ (даний посібник с. 223).

## **8 Контрольні питання**

1 Роль процесу сушіння у технологічних процесах переробного і харчового виробництва.

2 Які технологічні і економічні переваги забезпечує сушіння?

3 Перерахуйте, які види сушіння використовують у різних галузях виробництва.

4 Дайте характеристику об'єктам сушіння у харчовій і переробній промисловості.

5 Що розуміють під поняттям „рівновага при сушінні“?

6 Які види вологи мають місце в матеріалах для сушіння? При яких умовах видаляються ці види вологи?

7 Що називають „матеріальним балансом сушіння“? Яку роль він відіграє при розрахунках процесу сушіння?

8 Як визначаються питомі витрати теплоти при розрахунку теплового балансу сушіння?

9 Укажіть переваги та недоліки сушіння при пониженому тиску (сушіння у вакуумі) у порівнянні з конвективним камерним сушінням.

10 Два періоди процесу сушіння, їх характеристика, розрахунок оптимальної тривалості сушіння.



## **9 Тестові завдання**

**1) Укажіть, у яких координатах побудована крива сушіння?**

- а) час протікання процесу – швидкість сушіння;
- б) вологовміст матеріалу – тривалість сушіння;
- в) час (тривалість) сушіння – вологовміст матеріалу.

**2) Як називають процес сушіння, якщо підведення теплоти відбувається за допомогою теплопровідності?**

- а) конвективний; б) кондуктивний; в) терморадіаційний.

**3) За рахунок яких змінень можна інтенсифікувати процес конвективного сушіння?**

- а) збільшення температури та зменшення вологості повітря;
- б) зменшення температури та зменшення вологості повітря;
- в) збільшення температури та збільшення вологості повітря;

**4) Які зони характеризують гігроскопічний стан матеріалу на кривій змінення вологості матеріалу в процесі сушіння?**

- а) зони зволоження матеріалу і видалення вільної вологи;
- б) зони зволоження матеріалу і видалення зв'язаної вологи;
- в) зони видалення вільної вологи і зв'язаної вологи.

**5) Як змінюються показники сушильного агента (повітря) під час конвективного сушіння?**

- а) температура збільшується, вологість зменшується;
- б) температура зменшується, а вологість збільшується;
- в) температура і вологість залишаються незмінними.

## **Література**

1 Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. – Учебник. / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. М.: Колос, 1999. - 551 с.

2 Гулий І.С. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості" / І.С. Гулий, М.М. Пушанко, Л.О. Орлів, В.Г. Мирончук і інші. Вінниця. Нова книга, 2001. - 526 с.

3 Мирончук В.Г. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості./ В.Г Мирончук., Л.О. Орлов., А.І. Українець. та ін. Вінниця, 2004. - 288с.

4 Лебедев П.Д. Теплоиспользующие установки промышленных предприятий. / П.Д. Лебедев, А.А.Щукин - М.: Энергии, 1970. - 408 с.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОСТОЇ ПЕРЕГОНКИ БІНАРНИХ СУМІШЕЙ

**Мета роботи:** Практичне ознайомлення з будовою і принципом роботи установки періодичної дистиляції з дефлегмацією. Складання матеріального і теплового балансів процесу. Побудова зображення процесу на діаграмі сумішей.

Час виконання роботи 4 год.

### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основні теоретичні положення процесу простої перегонки бінарних сумішей;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальної установки періодичної дії;
- провести теоретичний розрахунок процесу перегонки;
- провести експериментальні дослідження процесу перегонки;
- обробити результати експерименту;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- оформити звіт по роботі і відзвітуватися перед викладачем.

### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** конспект лекцій за темою заняття та опрацювати рекомендовану літературу;

- **знати:**

1) область застосування процесів простої перегонки на переробних та харчових підприємствах, класифікацію обладнання;

2) основні етапи проведення перегонки бінарних сумішей;

- **вміти:** проводити налаштування експериментальної установки для періодичної перегонки, проводити розрахунки за темою роботи, користуватися контрольно-вимірювальними приладами, визначати залежності за темою дослідження, аналізувати результати досліджень.

### 3 Основні теоретичні положення

#### 3.1 Загальні відомості

Процес часткового випару рідини і утворення пари, при конденсації якої утворюється рідина нового складу – дистилят, називається дистиляцією (перегонкою). Дистилят містить більше легколеткого компонента, ніж вихідна рідина. Частина рідини, що не випарувалася, носить назву кубового залишку. Дистиляція заснована на відмінностях температур кипіння, парціального тиску і летючості окремих речовин, що входять до складу суміші.

Дистиляцію застосовують для розділення сумішей легколеткої речовини з певним вмістом труднолетучих речовин. Зазвичай просту перегонку використовують для попереднього розділення, очищення речовин від домішок, смол, забруднень. При цьому сконденсовані пари називають дистилятом, а рідину, що залишилася невивпареною – залишком.

Як правило, процес простої перегонки проводять періодично, хоча, в принципі, цей процес можна організувати і безперервним.

При періодичній перегонці рідина поступово випарується і пари, що утворюються при цьому, безперервно видаляються з системи та конденсуються з одержанням дистиляту (інколи цей спосіб називають простою дистиляцією). При цьому вміст низькокиплячого компонента в кубовій (початковій) рідині зменшується, що приводить до зниження вмісту низькокиплячого компонента в дистиляті. На початку процесу вміст низькокиплячого компонента максимальний, а в кінці – мінімальний.

Просту перегонку можна проводити при атмосферному тиску або під вакуумом (для зниження температури перегонки).

Для одержання потрібних фракцій (або різного складу дистиляту) застосовують фракційну або дробову перегонку.

Вихідну суміш завантажують у куб, що має змішувач для нагрівання і кип'ятіння цієї суміші. Пари, що утворюються, конденсуються у теплообміннику-конденсаторі, дистилят у ньому ж охолоджується до заданої температури і поступає в одну із збірок. Після закінчення процесу перегонки залишок зливають з куба і знов завантажують у нього вихідну суміш.

При простій перегонці пара, що утворюється, відводиться з апарата і в кожен даний момент часу знаходиться у рівновазі з рідиною, що залишилася (що приймається при аналізі цього процесу).

Основними термінами і визначеннями є наступні: низькокиплячий компонент – НКК, висококиплячий компонент – ВКК, рідина, отримана в результаті конденсації парів – дистилат або ректифікат.

Існує два види перегонки: проста перегонка (дистиляція) та ректифікація. У простому випадку вихідна суміш складається з двох компонентів. Така суміш називається бінарною.

Залежно від взаємної розчинності компонентів бінарні суміші можна розділити на групи:

- суміші з необмеженою розчинністю компонентів;
- суміші з взаємно нерозчинними компонентами;
- суміші з частковою розчинністю компонентів один в одному;

У свою чергу, суміші з необмеженою розчинністю компонентів за своєю поведінкою діляться на ідеальні і реальні (розчини). Ідеальними називають суміші, компоненти яких при змішуванні не змінюють об'єм, а само змішування проходить без теплових ефектів. Ідеальні суміші підпорядковуються закону Рауля, відповідно неідеальними вважаються суміші, що мають відхилення від закону Рауля.

Згідно з законом Рауля парціальний тиск кожного компонента в парі є пропорціональним мольній частці цього компонента в розчині.

### 3.2 Теоретичні положення

Як відомо, під час кипіння суміші вміст більш летючого компонента в парі, а отже, й у дистилаті, що утворюється під час конденсації пари, більший, ніж у рідині. Завдяки цьому в кубі поступово збільшується відносний вміст менш леткого компонента.

Склад рідини в перегінному апараті після випаровування деякої її частини і склад дистилату, що утворюється, можна визначити з матеріального балансу простої перегонки.

Оскільки відносний вміст компонентів суміші у перегінному апараті і дистилаті в процесі перегонки безперервно змінюється, матеріальний баланс складають у диференціальній формі для довільно вибраного моменту.

Виберемо наступні позначення:  $W$  – кількість суміші в апараті в будь-який момент перегонки, кг;  $X$  – склад рідини в перегінному апараті в масових частках легколеткого компонента в будь-який момент;  $Y$  – склад пари над рідиною у частках маси легколеткого компонента у будь-який момент.

Склад пари над рідиною можна подати як функцію складу рідини, тобто  $Y = f(X)$ . У процесі випаровування нескінченно малої кількості суміші  $dW$  із складом  $X$  концентрація рідини зменшується на величину  $dX$  і залишок рідини в кубі можна подати величиною  $W - dW$ , причому в цьому залишку легколеткого компонента буде  $(W - dW)(X - dX)$ . Склад дистилляту подають величиною  $Y$ , а кількість його  $dW$ .

Матеріальний баланс за легколетким компонентом у цьому разі можна записати у вигляді

$$WX = (W - dW)(X - dX) + dWY, \quad (1)$$

або

$$WX = WX - dWX - WdX + dWdX + dWY. \quad (2)$$

Нехтуючи добутком  $dWdX$  як нескінченно малою величиною другого порядку і перетворюючи останнє рівняння, одержуємо:

$$\frac{dW}{W} = \frac{dX}{Y - X}. \quad (3)$$

Якщо в результаті відгонки деякої певної кількості рідини в кубі залишиться  $W_K$  кг суміші і склад її буде  $X_K$ , а до початку перегонки кількість початкової суміші була  $W_n$  із складом  $X_n$ , то останнє рівняння можна проінтегрувати в межах від  $W_K$  і  $X_K$  до  $W_n$  і  $X_n$ .

Тоді отримаємо:

$$\int_{W_K}^{W_n} \frac{dW}{W} = X \int_{X_K}^{X_n} \frac{dX}{Y - X}, \quad \text{або} \quad \ln \frac{W_n}{W_K} = \int_{X_K}^{X_n} \frac{dX}{Y - X}. \quad (4)$$

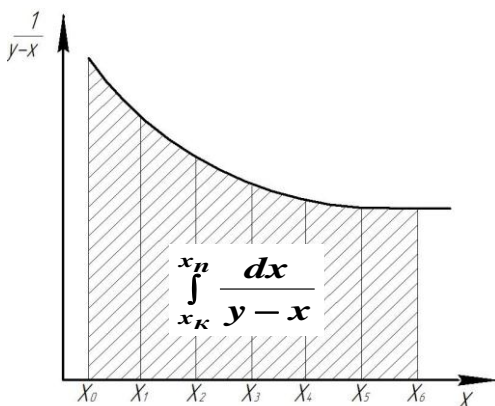
Оскільки функціональна залежність  $Y = f(X)$  подається тільки кривою рівноваги даної суміші, то рівняння (4) можна розв'язати графічно, а також за допомогою ЕОМ.

Розглянемо графічний спосіб розв'язання рівняння (4).

Користуючись кривою рівноваги, будемо діаграму (рисунок 1). На осі абсцис відкладаємо значення  $X$ , а на осі ординат – значення  $1/(Y - X)$ , де  $Y$  відповідно кожному значенню  $X$  визначається за кривою рівноваги для даної суміші. Площа під кривою, помножена на масштаб кожної з осей у межах від  $X_K$  і  $X_n$ , є інтеграл:

$$\int_{X_K}^{X_n} \frac{dX}{Y - X} = \ln \frac{W_n}{W_K} = A. \quad (5)$$

Знаючи значення інтеграла  $A$  і кількість початкової суміші  $W_n$ , можна легко визначити кількість кубового залишку  $W_K$ , склад якого  $X_K$ .



Кількість одержаного дистилляту  $W_d = W_n - W_K$ , склад  $X_d$  можна визначити з рівняння матеріального балансу за легколетким компонентом суміші:

$$W_d X_n = W_d X_d + W_K X_K. \quad (6)$$

звідки:

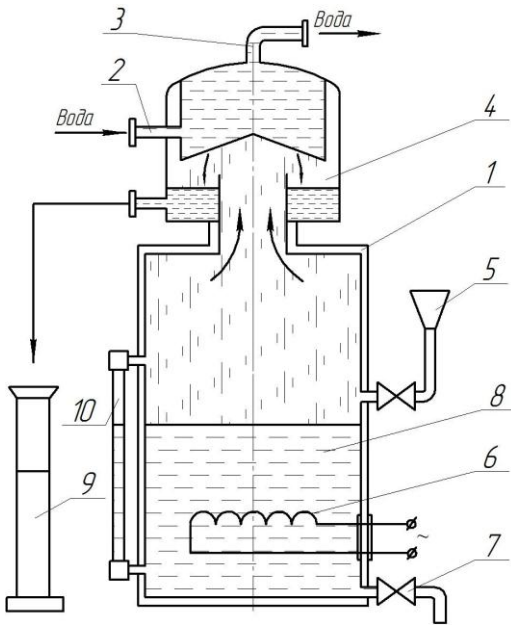
$$X_d = \frac{W_n X_n - W_K X_K}{W_d} \quad (7)$$

Рисунок 1 – Графічне вирішення інтеграла

#### 4 Оснащення лабораторної роботи механізмами і приладами

Установка для простої перегонки, схема якої показана на рисунку 2, складається з перегінного куба 1 з електронагрівником 6, конденсатором 4, приймальною воронкою 5, спускним краном 7 та водомірним склом 10.

Для проведення роботи готують лабораторний посуд та прилади: два скляних спиртометри зі шкалою від 0 до 50 та від 50 до 100% (об.), спиртовий термометр, два мірних циліндри місткістю 500мл та два місткістю 1000 мл, дві колби місткістю 0,5 і 0,3 л, міліметровий папір.



1 - перегінний куб;  
 2 - підведення охолоджуючої води;  
 3 - патрубок відведення охолоджувальної води;  
 4 - конденсатор; 5 - завантажувальна воронка; 6 - електронагрівач; 7 - кран зливу кубового залишку; 8 - бражка; 9 - мірна склянка; 10 - трубка рівня бражки в кубі.

Рисунок 2 – Схема лабораторної установки для дослідження простої перегонки

1 - перегінний куб;  
 2 - конденсатор;  
 3 - розподільна коробка;  
 4 - заливна горловина;  
 5 - трубка підведення охолоджувальної води;  
 6 - трубка відведення охолоджувальної води;  
 7 - трубка відведення дистиляту



Рисунок 3 – Фото експериментальної лабораторної установки

## 5 Теоретичний розрахунок процесу перегонки

*Визначити кількість і склад бражки*, для чого заповнити мензурку ємністю **500** мл бражкою, заміряти спиртометром зі шкалою **0...50** % (об.) концентрацію бражки  $X_n$  (об), заміряти температуру бражки термометром зі шкалою **0...100**° С або відповідним приладом.

Знаючи об'ємну концентрацію, за таблицею А1 (додаток А) визначити масову концентрацію і щільність бражки:

$$X_n \text{ (об)} = \dots \rightarrow X_n \text{ (мас)} = \dots \rightarrow \rho_{об} = \dots$$

За допомогою мірного циліндра ємністю 1000 мл відміряти початковий об'єм бражки для проведення дослідів  $V_n = 3000$  мл.

Розрахувати початкову масу бражки в кубі за формулою:

$$W_n = V_g \cdot \rho_{об}, \quad (8)$$

Розрахувати масу спирту в бражці:

$$P_n = W_n \cdot X_n \text{ (мас)} \quad (9)$$

Отримані експериментальні та розрахункові дані занести в стовпчик „Початкова суміш“ таблиці 2.

*Вирішити графічно інтеграл* 
$$\ln \frac{W_n}{W_k} = \int_{X_k}^{X_n} \frac{dX}{Y - X}$$

Провести розрахунок у формі таблиці 1, для чого:

- вибрати необхідні дані складу рідини і пари в межах від  $X_k$  до  $X_n$  за таблицею А2 додатку А. У розрахунку прийняти рекомендовані значення  $X_k = 3...5$  % (мас).

У таблиці 1 стовпець % (мас) від  $X_k$  до  $X_n$  бажано заповнити через один відсоток і перевести в стовпці 2 з відсотків у частки.

Після заповнення перших трьох стовпців провести розрахунки значень  $(Y - X)$  і  $1/(Y - X)$ , розрахунки проводити в частках.



Наприклад, при значеннях  $X_n = 18\%$  і  $X_k = 3\%$ , таблиця 1 буде мати вигляд:

Таблиця 1 – До розрахунку параметрів інтеграла

Вміст спирту		Різниця концентрацій	$I/(Y-X)$	У масштабі, мм		
у рідині				у парі	$X$	$I/(Y-X)$
$X, \%$ (мас)	$X_i$ часток	$Y_i$ часток	$Y - X$			
1	2	3	4	5	6	7
$X_k=3$	0,03	0,272	0,242	4,13	15	206,5
4	0,04	0,338				
5	0,05	0,370				
...	...	...	...	...	...	...
16	0,16	0,611				
17	0,17	0,622				
$X_n=18$	0,18	0,632				

Для побудови графіка визначення інтеграла вибрати масштаб осей, наприклад, для осі  $X$  приймаємо  $M_X = 0,002$  од/мм (у 1 мм міститься  $0,002$  од) і для осі  $I/(Y - X)$  масштаб  $M_{I/(Y - X)} = 0,02$  од/мм (у 1 мм міститься  $0,02$  од.).

Для побудови графіка значення, взяті з другого та п'ятого стовпця, слід поділити на відповідні масштаби і результати записати в шостий і сьомий. Наприклад:

$$\frac{X_k}{M_X} = \frac{0,03}{0,002} = 15 \text{ мм}, \quad \frac{I/(Y - X)}{M_{I/(Y - X)}} = \frac{4,13}{0,02} = 206,5 \text{ мм}.$$

Таким чином розрахувати дані для решти граф стовпців 6 і 7.

Для графічного рішення інтеграла за даними шостого і сьомого стовпця слід побудувати на міліметровому папері у прийнятих масштабах графік функції  $I/(Y - X) = f(X)$ , див. рисунок 1.

Визначити площу інтеграла  $\Phi$  (мм<sup>2</sup>), зробивши виміри на побудованому графіку 2.

Розрахувати значення інтеграла за виразом:

$$A = \int_{X_K}^{X_n} \frac{I}{Y - X} = \Phi \cdot M_x \cdot M_{I/(Y-X)}. \quad (10)$$

Визначити масу кубового залишку  $W_K$  (г) після перегонки, знаючи значення інтеграла  $A$  і кількість початкової суміші (бражки)  $W_n$ :

$$W_K = \frac{W_n}{e^A}, \quad (11)$$

де  $e=2,72$  - основа натурального логарифма.

Розрахувати масу дистилляту з рівняння масового балансу:

$$W_\partial = W_n - W_K. \quad (12)$$

Розрахувати концентрацію дистилляту за рівнянням

$$X_\partial = \frac{W_n \cdot X_n - W_K \cdot X_K}{W_\partial}. \quad (13)$$

Знайти щільність спирту з масової концентрації  $\rho_\partial$  (г/см<sup>3</sup>) за таблицею А1 (додаток А).

Визначити об'єм дистилляту (г) за виразом:

$$V_\partial = W_\partial / \rho_\partial. \quad (14)$$

Розрахувати кількість спирту в дистилляті:

$$P_\partial = W_\partial \cdot X_\partial \quad (15)$$

Визначити щільність кубового залишку  $\rho_{куб}$  при концентрації спирту  $X_K$  (мас) і температурі 20°C (таблиця А1, додаток А).

Розрахувати об'єм кубового залишку  $V_{куб}$ , (мл)

$$V_{куб} = W_r / \rho_{re}, \quad (16)$$

Розрахувати кількість спирту в кубовому залишку,  $P_{куб}$  :

$$P_{куб} = W_K \cdot X_K. \quad (17)$$

Результати розрахунків занести в таблицю 2.

## 6 Методика проведення експерименту

1 Визначити об'єм водно-спиртової суміші та вміст у ній (у об'ємних відсотках) спирту. Показання спиртометрів за таблицями для визначення вмісту етилового спирту у водно-спиртових сумішах зводити до показань при температурі 20 °С. Кількість суміші при цьому має бути **2,5...3,0** л з вмістом спирту **15...22** % (об.) при температурі 20 °С. Залити водно-спиртову суміш у порожній куб і закрити заливну горловину.

2 Задаючись вмістом легколеткого компонента (спирту) в кубовому залишку ( $X_K = 3...5$  % (об.) при температурі 20°C), розрахувати параметри процесу перегонки.

3 Відкрити кран підведення холодної води в конденсатор і увімкнути електронагрівник куба. Подачу води регулювати починаючи з моменту появи конденсату.

4 Відібравши розрахункову кількість дистиляту, припинити процес. Електронагрівник вимкнути за кілька хвилин до моменту відбирання потрібної кількості дистиляту (перегонка закінчиться за рахунок теплової інерції нагрівника).

5 Відібрати у мірний циліндр з зливного крана певну кількість кубового залишку.

6 З урахуванням температур дистиляту і кубового залишку виміряти їхню міцність у масових процентах.

7 Порівняти розрахункові значення  $X_D$  та  $X_K$  з одержаними в експерименті. Розбіжність не повинна перевищувати 1...2 %.

Таблиця 2. Експериментальні параметри процесу.

Параметр	Початкова суміш		Дистилят	Кубовий залишок	
	Розр.	Вимір	Розр.	Розр.	Вимір
Об'єм $V$ , мл					
Об'ємна концентрація $X$ , частка					
Маса суміші $W$ , г					
Густина $\rho$ , г/мл					
Маса спирту $P$ , г					



**4) Яку залежність демонструє вираз  $Y = f(X)$ ?**

- а) залежність складу пари над рідиною від складу рідини;
- б) залежність тиску пари над рідиною від складу рідини;
- в) залежність кількості пари над рідиною від складу рідини;

**5) Які розчини НЕ можуть бути розділеними на чисті компоненти шляхом перегонки?**

- а) розчини, що мають велику різницю в температурах кипіння;
- б) розчини з необмеженою розчинністю складових компонентів;
- в) розчини з екстремумами на діаграмі температура кипіння-склад.

**6) При перегонці суміші з необмеженою розчинністю компонентів співвідношення складу пари і рідини:**

- а) практично не міняється;
- б) весь час міняється;
- в) є величиною жорстко рівноважною.

**7) Просту перегонку проводять при значенні тиску:**

- а) тільки атмосферного;
- б) тільки підвищеного;
- в) при обох наведених значеннях.

**8) Через який патрубок конденсатора перегінного апарата подають охолоджуючу воду?**

- а) нижній;
- б) верхній;
- в) не має значення.

**9) Вкажіть вірне співвідношення між значеннями  $X_n$  і  $X_k$  ?**

- а)  $X_n > X_k$ ;
- б)  $X_n < X_k$ ;
- в)  $X_n = X_k$ .

**10) Яка перегонка, проста або дробова має більшу тривалість?**

- а) проста;
- б) дробова;
- в) однакова.

### **Література**

1. Горбатюк. В.И. Процессы и аппараты пищевых производств. / В.И. Горбатюк. - М.: Колос, 1999. - 335с.

2. Кавецкий Г.Д. Процессы и аппараты пищевой технологии. / Г.Д. Кавецкий, Б.В. Васильев. - М.: Колос, 2000. - 551с.

3. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.Д. Попов.- М.: Пищевая промышленность, 1978. - 660 с.

4. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум. За редакцією проф. І.Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2006. - 224 с.

Додаток А  
(довідковий)

Таблиця А1 – Співвідношення об'ємних і масових процентів і густин рідких водно-спиртових сумішей (проценти об'ємні при температурі 20 °С; значення густини при температурі 20 °С, віднесені до густини води при температурі 4 °С)

Процент		Густина, г/см <sup>3</sup>	Процент		Густина, г/см <sup>3</sup>
(об)	(мас)		(об)	(мас)	
0	0,00	0,99823	31	25,46	0,96100
1	0,79	0,99675	32	26,32	0,95972
2	1,59	0,99529	33	27,18	0,95839
3	2,38	0,99385	34	28,04	0,95704
4	3,18	0,99244	35	28,91	0,95536
5	3,98	0,99106	36	29,78	0,95419
6	4,78	0,98974	37	30,65	0,95271
7	5,59	0,98845	38	31,53	0,95119
8	6,40	0,98719	39	32,41	0,94964
9	7,20	0,98596	40	33,30	0,94806
10	8,01	0,98476	41	34,19	0,94644
11	8,83	0,98356	42	35,09	0,94479
12	9,64	0,98239	43	35,99	0,94308
13	10,46	0,98123	44	36,89	0,94134
14	11,27	0,98009	45	37,80	0,93956
15	12,09	0,97897	46	38,72	0,93755
16	12,91	0,97786	47	39,60	0,93591
17	13,74	0,97678	48	40,56	0,93404
18	14,56	0,97570	49	41,49	0,93213
19	15,39	0,97465	50	42,43	0,93019
20	16,21	0,97360	51	43,37	0,92822
21	17,04	0,97253	52	44,31	0,92621
22	17,88	0,97145	53	45,26	0,92418
23	18,71	0,97036	54	46,22	0,92212
24	19,54	0,96925	55	47,18	0,92003
25	20,38	0,96812	56	48,15	0,91790
26	21,22	0,96698	57	49,13	0,91576
27	22,06	0,96583	58	50,11	0,91358
28	22,91	0,96466	59	51,10	0,91138
29	23,76	0,96346	60	52,09	0,90916
30	24,61	0,96224			

Продовження таблиці А1

Процент		Густина, г/см <sup>3</sup>	Процент		Густина, г/см <sup>3</sup>
(об)	(мас)		(об)	(мас)	
61	53,09	0,90691	81	74,64	0,85652
62	54,09	0,90462	82	75,81	0,85369
63	55,11	0,91231	83	77,00	0,85082
64	56,13	0,89999	84	78,19	0,84791
65	57,15	0,89764	85	79,40	0,84495
66	58,19	0,89526	86	80,62	0,84193
67	59,23	0,89286	87	81,86	0,83888
68	60,27	0,89044	88	83,11	0,83754
69	61,33	0,88799	89	84,38	0,82926
70	62,39	0,88551	90	86,66	0,82759
71	63,46	0,88302	91	86,97	0,82590
72	64,54	0,88051	92	88,29	0,82247
73	65,53	0,87796	93	89,63	0,81893
74	66,72	0,87538	94	91,00	0,81526
75	67,83	0,87277	95	92,41	0,81144
76	68,94	0,87015	96	93,84	0,80748
77	70,06	0,86749	97	95,30	0,80334
78	71,19	0,86480	98	96,81	0,79894
79	72,33	0,86206	99	98,38	0,79431
80	73,48	0,85932	100	100,0	0,78927

Таблиця А2 – Склад киплячої водно-спиртової рідини і пари, що з неї утворюється і температура кипіння при атмосферному тиску

Вміст спирту в рідині		Температура кипіння, °С	Вміст спирту в парі		Вміст спирту в рідині		Температура кипіння, °С	Вміст спирту в парі	
(мас.) %	(мол.) %		(мас.) %	(мол.) %	(мас.) %	(мол.) %		(мас.) %	(мол.) %
0,01	0,004	99,9	0,13	0,053	0,90	0,35	98,9	9,9	4,12
0,10	0,004	99,8	1,2	0,51	1,0	0,39	98,75	10,75	4,51
0,20	0,08	99,6	2,6	1,08	2,0	0,79	97,65	19,7	8,76
0,30	0,12	99,5	3,8	1,57	3,0	1,19	96,65	27,2	12,75
0,40	0,16	99,4	4,9	1,98	4,0	1,61	95,8	33,8	16,34
0,50	0,19	99,3	6,1	2,48	5,0	2,01	94,95	37,0	18,68
0,60	0,23	99,2	7,1	2,90	6,0	2,43	94,15	41,1	21,45
0,70	0,27	99,1	8,1	3,33	7,0	2,86	93,35	44,6	23,96
0,80	0,31	99,0	9,0	3,72	8,0	3,29	92,6	47,6	26,21

Продовження таблиці А2

Вміст спирту в рідині		Температура кипіння, °С	Вміст спирту в парі		Вміст спирту в рідині		Температура кипіння, °С	Вміст спирту в парі	
(мас.) %	(мол.) %		(мас.) %	(мол.) %	(мас.) %	(мол.) %		(мас.) %	(мол.) %
9,0	3,73	91,9	50,0	28,12	49,0	27,32	82,0	76,8	56,44
10,0	4,16	91,3	52,2	29,92	50,0	28,12	81,9	77,0	56,71
11,0	4,61	90,8	54,1	31,56	51,0	28,93	81,8	77,3	57,12
12,0	5,07	90,5	55,8	33,06	52,0	29,80	81,7	77,5	57,41
13,0	5,51	89,7	57,4	34,51	53,0	30,61	81,6	77,7	57,70
14,0	5,98	89,2	58,8	35,83	54,0	31,47	81,5	78,0	58,11
15,0	6,46	89,0	60,0	36,98	55,0	32,34	81,4	78,2	58,39
16,0	6,86	88,3	61,1	38,06	56,0	33,24	81,3	78,5	58,78
17,0	7,41	87,9	62,2	39,16	57,0	34,16	81,2	78,7	59,10
18,0	7,95	87,7	63,2	40,18	58,0	35,09	81,2	79,0	59,55
19,0	8,41	87,4	64,3	41,27	59,0	36,02	81,1	79,2	59,84
20,0	8,92	87,0	65,0	42,09	60,0	36,98	81,0	79,5	60,29
21,0	9,42	86,7	65,8	42,94	61,0	37,97	80,9	79,7	60,58
22,0	9,93	86,4	66,6	43,82	62,0	39,22	80,8	80,3	61,30
23,0	10,43	86,2	67,3	44,61	63,0	40,2	80,7	80,4	61,55
24,0	11,00	85,95	68,0	45,41	64,0	41,02	80,6	80,5	61,76
25,0	11,53	85,7	68,6	46,08	65,0	42,09	80,6	80,8	62,22
26,0	12,08	85,4	69,3	46,90	66,0	43,17	80,5	81,0	62,52
27,0	12,64	85,2	69,8	47,49	67,0	44,27	80,4	81,3	62,99
28,0	13,19	85,0	70,3	48,08	68,0	45,41	80,4	81,6	63,43
29,0	13,77	84,8	70,8	48,68	69,0	46,53	80,3	81,9	63,91
30,0	14,35	84,7	71,3	49,30	70,0	47,72	80,2	82,1	64,21
31,0	14,95	84,5	71,7	49,77	71,0	48,92	80,1	82,4	64,70
32,0	15,55	84,3	72,1	50,27	72,0	50,16	80,0	82,8	65,35
33,0	16,16	84,2	72,5	50,78	73,0	51,39	79,9	83,1	65,81
34,0	16,77	83,85	72,9	51,27	74,0	52,68	79,8	83,4	66,28
35,0	17,41	83,75	73,2	51,67	75,0	54,0	79,7	83,8	66,93
36,0	18,03	83,7	73,5	52,04	76,0	55,34	79,7	84,1	67,42
37,0	18,68	83,5	73,8	52,43	77,0	56,71	79,7	84,5	68,07
38,0	19,34	83,4	74,0	52,68	78,0	58,11	79,65	84,8	68,76
39,0	20,00	83,3	74,3	53,09	80,0	61,02	79,5	85,8	71,15
40,0	20,68	83,1	74,6	53,49	82,0	64,05	79,3	86,7	71,86
41,0	21,38	82,95	74,8	53,76	84,0	67,27	79,1	87,7	73,61
42,0	22,07	82,78	75,1	54,12	86,0	70,62	78,85	88,9	75,81
43,0	22,79	82,65	75,4	54,53	88,0	74,31	78,68	90,1	78,12
44,0	23,51	82,50	75,6	54,80	90,0	77,88	78,5	91,3	80,42
45,0	24,25	82,45	75,9	55,22	92,0	81,82	78,3	92,65	83,15
46,0	25,00	82,35	76,1	55,48	93,0	83,86	78,25	91,9	84,8
47,0	25,75	82,25	76,3	55,74	94,0	85,97	78,2	91,2	86,40
48,0	26,53	82,15	76,5	56,03	95,0	88,15	78,18	95,05	88,25



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА

### ДОСЛІДЖЕННЯ АДГЕЗІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ТЕНЗОМЕТРУВАННЯ

**Мета роботи:** Оволодіти методикою визначення адгезійних властивостей харчових продуктів, експериментальним шляхом визначити адгезію різних видів сільськогосподарської сировини.

Час виконання роботи 4 год.

#### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути загальні теоретичні відомості з використання явища адгезії у технологічних процесах переробних та харчових виробництв;
- уяснити основні принципи визначення адгезійних характеристик різних видів харчової сировини і готових продуктів;
- ознайомитись з принципом дії та будовою лабораторного пристрою для вивчення закономірностей явища адгезії;
- провести експериментальні визначення адгезійних характеристик різних об'єктів дослідження;
- обробити результати експерименту;
- сформулювати висновки за результатами роботи;
- оформити звіт по роботі і зарахувати його у викладача.

#### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- **повторити:** конспект лекцій за темою заняття та опрацювати відповідну літературу;
- **знати:**
  - принципи дії та будову обладнання для визначення адгезійних характеристик тензометричним методом;
- **вміти:** проводити налаштування лабораторного пристрою, проводити досліди згідно з їх методикою, аналізувати результати досліджень, оформлювати графіки експериментальних залежностей.

### 3 Основні теоретичні положення

Під *адгезією* (лат. *adhaesio* – прилипання, зчеплення, притягання) розуміють явище прилипання різних за структурою матеріалів при їх поверхневому контакті, внаслідок чого утворюється так званий адгезійний зв'язок. Це явище дуже широко розповсюджено в техніці, з ним у більшості випадків борються як з небажаним, хоча в деяких процесах бажають прилипання збільшити.

Здатність матеріалів виявляти певні зусилля взаємодії з іншим матеріалом або контактуючими з ними поверхнями з металу або тканини називають *адгезією*. За визначенням теорії адгезії досліджуваній матеріал носить назву *адгезиву*, а матеріал, з яким він контактує – *субстрату*.

Крім явища *адгезія* існують супутні явища когезія і аутогезія. Термін *когезія* характеризує міжмолекулярну взаємодію усередині однієї фази – явище зчеплення атомів, молекул або іонів даної речовини. Термін *аутогезія* означає зв'язок між собою часток сипучих мас.

На формування адгезійного зв'язку між харчовими масами і конструкційними матеріалами вирішальний вплив здійснюють їх реологічні властивості, шорсткість поверхні субстрату, тривалість і напруження контакту, температура адгезиву і субстрату, спосіб і швидкість відриву, а також наявність між адгезивом і субстратом граничного шару, нанесеного за допомогою мастила, напилення або покриття.

Саме адгезія визначає зв'язок харчових мас з поверхнями технологічного обладнання (ємності, транспортери, трубопроводи, арматура, ін.).

Сила взаємодії між тілами на межі їх контакту визначається за рівнянням:

$$F = f \cdot (F_k + p_o \cdot S_o), \quad (1)$$

де  $f$  - дійсний коефіцієнт зовнішнього тертя;

$F_k$  - нормальне навантаження, Н;

$F_o$  - питоме зусилля прилипання, Па;

$S_o$  - площа контакту двох тіл, м<sup>2</sup>.

Уведене поняття „ефективний коефіцієнт зовнішнього тертя“  $f_{ef}$ , який обчислюється за формулою:

$$f_{ef} = p_{mp}/p_k, \quad (2)$$

де  $p_{mp}$  і  $p_k$  - відповідно, напруження тертя і контакту, Па.

Ефективний коефіцієнт може бути пов'язаний з істинним коефіцієнтом наступним співвідношенням:

$$f_{ef} = f \cdot (1 + F_o/F_k) \quad (3)$$

Відрив пластини від продукту:

$$1/p_o = h/2a + C/w_c, \quad (4)$$

де  $p_o$  - адгезійне напруження, Па.

$h$  - товщина продукту між пластинами, м;

$a$  - коефіцієнт, аналогічний коефіцієнту поверхневого натягу, Н/м;

$C$  - коефіцієнт пропорційності, який характеризує темп убування площі контакту, м<sup>2</sup>/с;

$w_c$  - швидкість збільшення відриву, Н/с.

З урахуванням методів оцінки і особливостей різних видів адгезії, способів визначення її величини і властивостей харчових мас розрізняють адгезію сипучих, пружно-пластичних і рідких продуктів (таблиця 1).

У таблиці перелічені тільки деякі основні харчові маси. Адгезія спостерігається на усіх стадіях технологічного процесу: при транспортуванні і переробці сировини, на проміжних стадіях, при упакуванні і зберіганні готового продукту і т.д.

Наведена класифікація адгезії у залежності від властивостей харчових продуктів основана на наступних уявленнях.

Адгезія, як поверхневе явище, виникає на межі розділу фаз різно-рідних конденсованих тіл: харчові маси – одна фаза, поверхня контакту – друга фаза. Тобто, мова йде про межу розділу рідина-тверде тіло ( $P - T$ ) і тверде тіло – тверде тіло ( $T_1 - T_2$ ).

Таблиця 1 – Класифікація харчових мас з урахуванням особливостей їх адгезії

Харчові маси	Межа фаз	Площа контакту	Представники продуктів
Рідкі	$P - T$	Безперервна	Олія рослинна, винно-горілчані вироби, безалкогольні напої, соки, молоко, харчові емульсії (майонез), рідкі добавки
Пружно-пластичні	$T_1 - T_2$	Безперервна	Тісто, конфетні маси, креми, пасти, м'ясо і його вироби, риба і її вироби, сир, вершкове масло, маргарин, джеми, варення, овочі, фрукти
Сипучі	$T_1 - T_2$	Переривчаста	Борошно, крупа, цукор, сіль, кофе, крохмаль, чай, какао, ячний порошок, сухе молоко, дитяче харчування
Плівкові	$T_1 - T_2$	Безперервна	Сир, ковбасні вироби, молочні продукти та ін.

У зв'язку з тим, що адгезія харчових матеріалів являє собою перш за все поверхневе явище, тому можливі наступні напрями впливу на характеристики поверхні субстрату „конструкційного матеріалу“ і поверхні адгезиву „харчового продукту“:

- підбір матеріалу субстрату в залежності від його функціонального призначення для ослаблення або посилення адгезійної взаємодії з харчовим об'єктом, застосування антиадгезійних матеріалів і покриттів або матеріалів, які мають підвищену адгезійну спроможність;

- створення пограничного (проміжного) шару шляхом нанесення твердого або рідиноподібного покриття на поверхню контакту (змащення маслом або борошняною заваркою, посипка борошном або крохмалем, створення плівки конденсату, тощо.)

- направлене змінення фізичного стану поверхні адгезиву (наприклад, попередній обдув повітрям, підсушування або ж будь-яка термічно-вологісна обробка);

- внесення у харчовий продукт добавок (незначна зміна рецептури уведенням, наприклад, поверхнево-активних модифікаторів);

- змінення енергетичних рівнів поверхонь контакту адгезиву і субстрату (наприклад, створення у зоні контакту подвійного електричного шару шляхом накладення постійного електричного поля).

Для зниження адгезії харчових мас у промисловості широко використовуються різні полімерні матеріали, покриття облицювання і напилювання, внаслідок чого підвищуються ефективність технологічних процесів та якість виробів. Застосування полімерних матеріалів на харчових підприємствах знижує прилипання харчової маси, зменшує витрати часу на обслуговування обладнання, покращує зовнішній вигляд виробів і т.д.

Прилади і методи вимірювання адгезійних характеристик засновані на руйнуванні адгезійного з'єднання шляхом прикладення зовнішнього зусилля. За способом прикладення зусилля розрізняють методи відриву рівномірного і нерівномірного та зсуву.

На величину адгезії, окрім технологічних властивостей самого продукту (температура, вологість, склад, ступінь подрібнення, тощо) і марки конструкційного матеріалу, впливають умови вимірювання – геометричні, кінематичні і динамічні параметри приладу. Тому до адгезіометрів пред'являються особливі вимоги:

1) Перед вимірюванням продукт потрібно притиснути до субстрату для встановлення контакту і видалення з нього повітряних пухирців. Чим більше зусилля і тривалість контакту, тим краще продукт заповнює мікрорельєф поверхні. У результаті він контактує з усією поверхнею, площа якої може бути більше геометричної. Таким чином, зусилля і тривалість попереднього контакту повинні змінюватися у широкому діапазоні;

2) Вимірювання, проведені на пластинах субстрату, які мають різну площу при різній товщині шару, дають різні числові значення адгезійних характеристик за інших рівних умов. Тому повинен бути застосований певний шаблон для нанесення продукту заданої товщини на пластину;

3) Різні марки матеріалу пластин, ступінь і якість його обробки впливають на міцність молекулярних контактів. У приладі повинна бути передбачена можливість заміни пластин, які виготовлені з різного матеріалу при різній шорсткості поверхні;

4) Тривалість і кінетика прикладення зусилля відриву по різному впливають на розподіл деформацій і зусиль між пластинами, тому прилади повинні допускати варіювання швидкості прикладання сили відриву або зсуву в широкому діапазоні.

Прилади для визначення адгезійних характеристик за способом прикладення навантаження ділять на адгезіометри з поступовим відривом, адгезіометри з миттєвим відривом, а також зсувометри.

При рівномірному відриві навантаження прикладається перпендикулярно до площини субстрату, при цьому адгезія характеризується нормальною силою, віднесеною до одиниці площі контакту, тобто, нормальним напруженням. При зсуві визначаються дотичні напруження, які виникають при відносному зсуві шарів адгезиву відносно субстрату.

Для дослідження адгезії харчових в'язко-пластичних матеріалів використовуються, в основному, прилади, засновані на способі нормального відриву. На таких приладах визначають адгезійні характеристики м'ясних напівфабрикатів, тіста, борошна, кондитерських мас та багатьох харчових продуктів.

#### **4 Оснащення лабораторної роботи приладами і механізмами**

При дослідженні адгезійних характеристик застосовується прилад, який використовує принципи, що реалізують нормальний розрив двох плоско-паралельних поверхонь, між якими перебуває продукт.

При проведенні лабораторної роботи досліди проводяться на приладі, у якому зусилля відриву пластини вимірюється за деформацією тензометричної балки з фіксацією результатів на стрілочному приладі або з записом сигналу на стрічці осцилографу. Балка встановлена так, що допускає тарування до і після дослідів.

Прилад (рис. 1) працює наступним чином: для закріплення зразка служать затискачі 2.

Гайка 7, на якій закріплена тензометрична балка 5, утворює із ходовим гвинтом різьбове сполучення. При обертанні ходового гвинта 6 у ту або іншу сторону гайка 7 із закріпленою тензометричною балкою 5 переміщається угору або донизу. Обертання гвинта здійснюється вручну рукояткою 8.

До тензометричної балки 5 кріпиться пластина 4, яка повинна контактувати з продуктом, що досліджується.

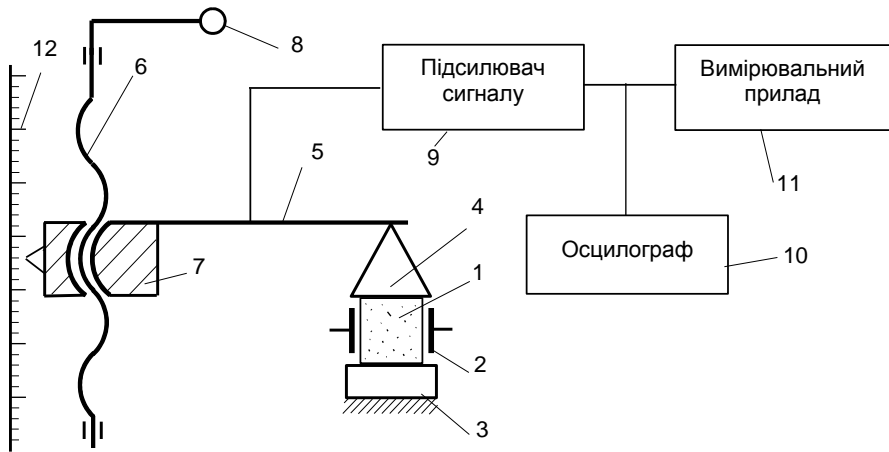


Рисунок 1 – Лабораторний прилад для вимірювання адгезії:

1 - зразок; 2 - затискач; 3 - нерухома площина; 4 - пластина; 5 - тензометрична балка; 6 - гвинт; 7 - гайка; 8 - рукоятка; 9 - тензометричний підсилювач; 10 - осцилограф; 11 - вимірювальний прилад; 12 - лінійка.

Пластини 4 виготовляються з вуглецевої сталі Ст. 3 та нержавіючої сталі 1Х18Н9Т.

Перед контактом пластини 4 з продуктом вона повинна бути ретельно очищена, знежирена та просушена.

У якості вимірювальної апаратури використовується тензометричний підсилювач „Топаз“, осцилограф Н-115, гальванометр.



Рисунок 2 – Фото лабораторного місця вивчення явища адгезії

### 5 Методика проведення лабораторної роботи

а) Перед проведенням дослідів провести тарування пластини і побудувати тарувальний графік.

б) Закріпити зразок у затискачах 2. Опустити пластину за допомогою ходового гвинта 6 до утворення контакту з матеріалом.

в) Виміряти площу контакту на пластині  $S_0$ , м<sup>2</sup>;  $S_0 =$

г) Для створення попереднього контакту на пластину 4 встановити вантажі залежно від того, яке значення тиску попереднього контакту необхідно створити. Тривалість витримки попереднього контакту прийняти 30, 60, 180, 300 і 600 с.

д) За допомогою ходового гвинта 6 повільно підняти пластину. За показаннями гальванометра за допомогою тарувального графіка (рисунок 3) визначити навантаження і силу відриву.

Повторність дослідів трикратна.

е) Результати дослідів занести в таблицю 2.

Таблиця 2 – Результати дослідів

Тривалість витримки, с	Сила відриву, Н	Адгезія, Па
30		
60		
180		
300		
600		



є) Визначити залежність адгезії від тиску попереднього контакту. Результати занести в таблицю 3.

Таблиця 2 – Результати дослідів

Величина навантаження, Н	Сила відриву, Н	Адгезія, Па

ж) Обчислити значення адгезії і занести їх у таблиці 2 і 3;

з) За результатами дослідів і розрахунків побудувати графіки залежності адгезії від тривалості попереднього контакту і величини навантаження (рисунки 3 і 4).

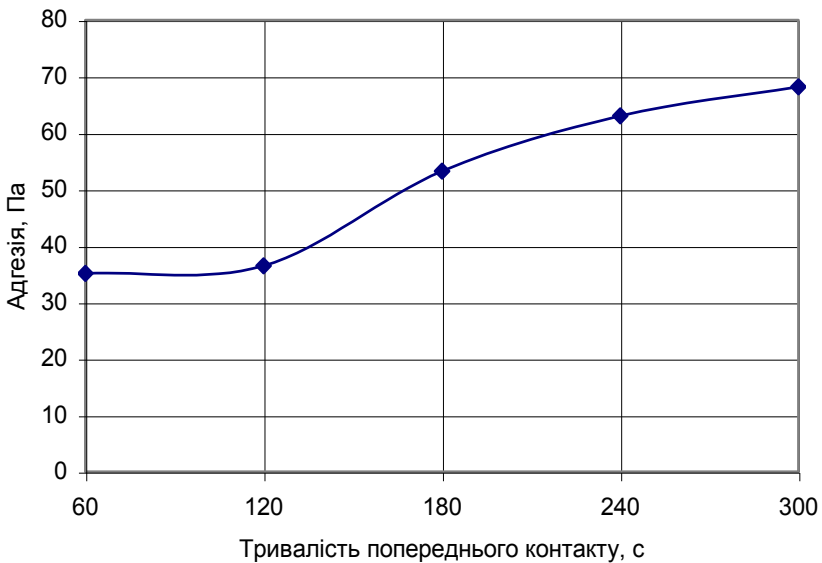
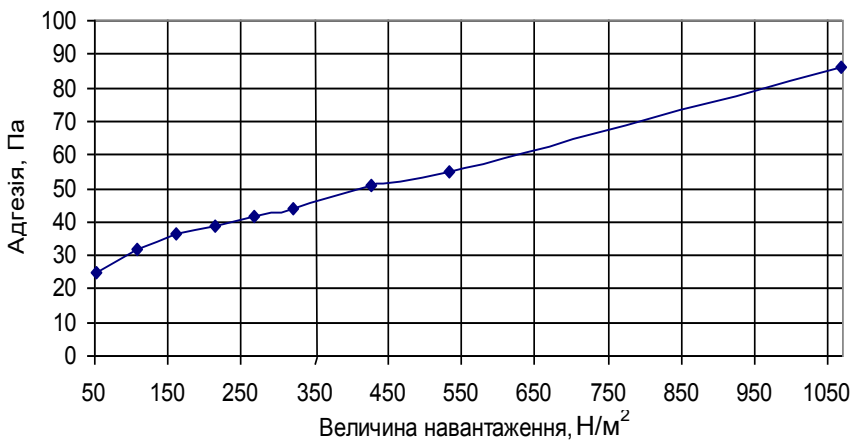


Рисунок 3 – Приклад оформлення залежності адгезії від тривалості попереднього контакту



## 6 Вимоги техніки безпеки

Під час проведення роботи додержуватись загальної інструкції з охорони праці, наведених у розділі „Загальні вимоги безпеки“.

## 7 Обробка експериментальних даних

Адгезія  $p_0$  (Па) визначається як питома сила нормального відриву від пластини:

$$p_0 = F_e / S_0 , \quad (5)$$

де  $F_e$  - сила відриву, Н;

$S_0$  - геометрична площа пластини, м<sup>2</sup>.

## 8 Контрольні питання

- 1 Яке явище розуміється під адгезією?
- 2 Поясніть поняття „адгезія“, „когезія“ і „аутогезія“.
- 3 Які чинники впливають на формування адгезійного зв'язку між харчовими продуктами і конструктивними матеріалами?
- 4 Які Ви знаєте способи впливу на адгезію харчових продуктів?
- 5 Вимоги, що ставляться до адгезіометрів.
- 6 Види адгезіометрів за способом прикладення навантаження.
- 7 Охарактеризуйте спосіб визначення зусиль методом тензометрії.

## 9 Тестові завдання

1) Як називають явище прилипання різних за структурою матеріалів при їх поверхневому контакті?

- а) адгезія;                      б) когезія;                      в) аутогезія.

2) Як називають міжмолекулярну взаємодію усередині однієї фази – явище зчеплення атомів, молекул або іонів даної речовини?

- а) адгезія;                      б) когезія;                      в) аутогезія.

3) Як називають елемент технологічного обладнання, з яким контактує харчова маса при вивченні явища адгезії?

- а) адгезив;                      б) когезив;                      в) субстрат.

4) Вкажіть розмірність адгезії.

- а) Н×м;                      б) Па;                      в) Н/м.

5) До якої групи за методом прикладення зусилля відносять прилад, який застосовують у даній роботі?

- а) рівномірного відриву;                      б) нерівномірного відриву;  
в) постійного зсуву.

## Рекомендована література

1 Зимон А.Д Адгезия пищевых масс. / А.Д. Зимон, А.М. Евтушенко. - М.: Де-Ли Принт, 2008. - 398 с.

2 Падохин В.А. Физико-механические свойства сыра и пищевых продуктов / В.А. Падохин, Н.Р. Кокина. - Иваново, 2007. - 128 с.

3 Муратова Е.И. Реология кондитерских масс: монография / Е.И. Муратова, П.М. Смолихина. - Тамбов: ФГБОУ ВПО „ТГТУ“. 2013. - 188 с.

4 Изучение адгезионных свойств пищевых масс. / НГТУ сост.: В.А. Комаров, М.Н. Чубенко. - Н.Новгород, 2013. - 18 с.

5 Кузнецов О.А. Реология пищевых масс: Учебное пособие / О.А. Кузнецов, Е.В. Волошин, Р.Ф. Сагитов. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с.