



ЛУЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Методичні вказівки до лабораторних занять
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітніх програм «Харчові технології» та «Експертиза харчових
продуктів та продовольчої сировини»
галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво
спеціальності G13 Харчові технології
денної та заочної форм навчання

УДК 664(075.8)

П 161

Голова вченої ради факультету митної справи,
матеріалів та технологій ЛНТУ _____ В. В. Ткачук

Затверджено вченою радою факультету митної справи, матеріалів та
технологій ЛНТУ, протокол № __ від _____ 2026 року

Електронна копія друкованого видання передана для внесення
в репозиторій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н. П. Поліщук

Рекомендовано до видання на засіданні кафедри харчових технологій та хімії
ЛНТУ, протокол № __ від _____ 2026 року

Завідувач кафедри ХТХ _____ І. М. Дударєв

Укладач:

_____ С. Г. Панасюк, кандидат технічних наук, доцент, доцент
кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ

Рецензент: _____ В. А. Сай, кандидат технічних наук, доцент, доцент
кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ І. М. Дударєв, доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ

П 161 Процеси і апарати харчових виробництв [Текст]: методичні
вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти освітніх програм «Харчові
технології» та «Експертиза харчових продуктів та продовольчої
сировини» галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво
спеціальності G13 Харчові технології денної та заочної форм
навчання / уклад. С. Г. Панасюк. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 44 с.

Методичне видання складене для надання методичної допомоги
здобувачам вищої освіти при виконанні лабораторних робіт і містить
теоретичні відомості та типові приклади вирішення завдань.

© С.Г. Панасюк, 2026

ПЕРЕДМОВА

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв» розроблено відповідно до чинної освітньо-професійної програми підготовки фахівців у галузі харчових технологій та спрямовано на формування у здобувачів вищої освіти системи теоретичних знань і практичних навичок з основних процесів і апаратів, що використовуються у харчовій промисловості.

Дисципліна «Процеси і апарати харчових виробництв» є фундаментальною у професійній підготовці майбутніх інженерів-технологів, оскільки забезпечує розуміння фізичних, фізико-хімічних і гідромеханічних закономірностей перебігу технологічних процесів, а також принципів будови та роботи відповідного обладнання. Лабораторні роботи відіграють важливу роль у закріпленні теоретичного матеріалу, розвитку інженерного мислення, навичок експериментальних досліджень, аналізу та узагальнення отриманих результатів.

У методичних вказівках наведено мету та завдання кожної лабораторної роботи, короткі теоретичні відомості, опис лабораторних установок, порядок виконання дослідів, вимоги до обробки експериментальних даних, а також контрольні запитання для самоперевірки. Особливу увагу приділено питанням техніки безпеки під час роботи з лабораторним обладнанням.

Запропоновані методичні вказівки призначені для здобувачів вищої освіти денної та заочної форм навчання і можуть бути використані викладачами під час організації та проведення лабораторних занять з дисципліни «Процеси і апарати харчових виробництв».

Лабораторна робота №1 ВИПРОБУВАННЯ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ

- Мета роботи: 1. Ознайомитись з будовою і роботою молоткової дробарки.
2. Визначити дисперсний склад і степінь подрібнення за показниками ситового аналізу.
3. Визначити витрату енергії на розмелювання.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Подрібненням називається збільшення поверхні твердого матеріалу шляхом зменшення розмірів її кусків. Результат подрібнення характеризується величиною, яку називають степінь подрібнення, яка визначається як відношення середнього характерного розміру D шматка матеріалу до подрібнення до середнього характерного розміру d шматка після подрібнення:

$$i = \frac{D}{d}, \quad (1.1)$$

Визначальними лінійними розмірами кусків кулеподібної форми є діаметри D (d_n), d (d_k), а для частинок неправильної форми може бути їхня середня геометрична величина. Практично вона визначається розміром отворів сит, крізь які просівають весь матеріал до і після подрібнення. Використовують також поняття об'ємний ступінь подрібнення: $i = d_n / d_k$.

В харчовій промисловості великого поширення набули молоткові дробарки, які застосовуються в тих випадках, коли на одному ступені подрібнення необхідно отримати високодисперсну суміш подрібнених частинок. Молоткові дробарки і млини застосовують для подрібнення матеріалів середньої твердості і м'якої, невеликої вологості і в'язкості. Вони використовуються для дроблення зерна злакових, бобових культур, кукурудзи тощо.

Принцип дії молоткових дробарок і млинів полягає в подрібненні матеріалів ударами жорстко або шарнірно закріпленими молотками, що швидко обертаються разом з ротором.

Молотки повинні рухатись з такою окружною швидкістю, при якій, забезпечувалося б руйнування матеріалу в момент удару молотка по ньому. Цю швидкість можна визначити, виходячи із закону кількості руху:

$$m(v_1 - v_0) = F\tau, \quad (1.2)$$

де m – маса частинки, яка подрібнюється;

v_0 і v_1 – швидкість руху частинки до удару об молоток і після удару;

F – середня миттєва сила опору руйнуванню частинки;

τ - тривалість удару.

Оскільки, $v_0 \ll v_1$, то приймаємо : $mv_1 = F \tau$. Звідки

$$v_1 = \frac{F \tau}{m}, \quad (1.3)$$

Наприклад, для зерна пшениці $m = 2,84 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$; $F = 118 \text{ Н}$; $\tau = 10^{-5} \text{ с}$.

$$v_1 = \frac{118 \cdot 10^{-5}}{2,94 \cdot 10^{-5}} = 40 \text{ м/с}$$

Для визначення середнього розміру частинок до і після подрібнення матеріалу пробу просіюють через набір сит, зважують сходові фракції і знаходять числове значення розміру частинок. Крупність розмелювання в молоткових дробарках в основному визначається розміром і конфігурацією отворів сита. Чим менший розмір цих отворів, тим дрібніший готовий продукт.

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Схема молоткової дробарки зображена на рис. 1.1.

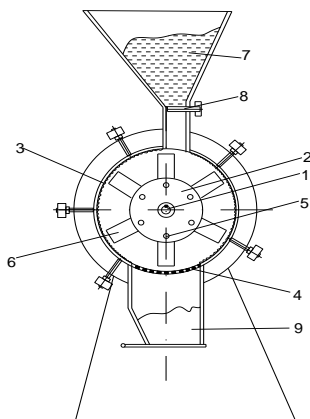


Рисунок 1.1 – Схема молоткової дробарки

На валу 1 за допомогою шпонки та болтів 4 закріплені два диски 2 з проміжними кільцями. До дисків 2 на стержнях 5 підвішені молотки 6. Вал обертається в двох кулькових підшипниках. Вал 1 отримує обертальний рух від електродвигуна через клинопасову передачу. В нижній частині дробарки в кільцевій пази корпусу закріплено змінне сито 10. У верхній частині дробарки змонтовано бункер 7 для завантаження матеріалу, який підлягає подрібненню. Для регулювання подачі матеріалу в корпус дробарки передбачено дозуючий пристрій 8.

Працює молоткова дробарка наступним чином.. Матеріал завантажується у бункер 7 і через дозуючий пристрій 8 потрапляє всередину дробарки. Матеріал при ударі молотків 6 і взаємодії з декою 3 подрібнюється і через сито 10 в розмеленому вигляді потрапляє в забірник 11.

Загальний вигляд лабораторної дробарки представлено на рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Загальний вигляд лабораторної дробарки

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Наважку матеріалу (зерно пшениці, ячменю, кукурудзи та ін.) засипають в бункер молоткової дробарки. Вмикають електродвигун, який приводить в рух вал з дисками, і відкривають дозуючий пристрій 8. Подрібнюють матеріал, використовуючи лускоподібне, а потім звичайне сито. При цьому фіксують час, що затрачається на подрібнення наважки матеріалу.

2. В процесі випробування дробарки визначають потужність холостого ходу електродвигуна N_{xx} ватметром. Після цього завантажують дробарку до заданої продуктивності і вимірюють потужність електродвигуна під навантаженням N_p . Зважують подрібнений продукт, який виходить з дробарки. Експеримент проводять у трьох-чотирьох повторностях.

Таблиця 1.1 – Результати вимірювань

№ з/п	Діаметр сита, мм	Маса наважки, кг		Тривалість подрібнення, с	Продуктивність, кг/с	Питома витрата енергії на подрібнення, кВт*с/кг	Втрати зерна, %
		до подрібнення	після подрібнення				

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ

Істинну продуктивність молоткової дробарки (в кг/с) визначають за формулою:

$$G_{icm} = \frac{m_{\tau}}{\tau}, \quad (1.4)$$

де m_{τ} - маса наважки подрібненого продукту, кг;

τ - тривалість подрібнення наважки, с.

Степінь подрібнення продукту знаходять за формулою (1.1).

Питому витрату енергії (в кВт·с/кг) розраховують за формулою:

$$N_{num} = \frac{(N_p - N_{x.x.})}{G_{icm}}. \quad (1.5)$$

За даними експерименту будують графіки зміни дисперсності продукту $d_{cp}=f(d_c)$ степеню подрібнення $i=f(d_c)$ і питомої витрати енергії $N_{num}=f(d_c)$ в залежності від діаметру отворів сита.

Контрольні запитання

1. Принцип дії і будова молоткової дробарки.
2. Які параметри характеризують роботу дробарок?
3. Як впливають форма і розмір отворів сита на величину подрібненого продукту, витрату енергії і продуктивність дробарки?

Лабораторна робота №2 СИТОВИЙ АНАЛІЗ СИПКОЇ СУМІШІ

Мета роботи: визначити фракційний склад сипкої суміші подрібненого зерна та побудувати графік ситового аналізу.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Сортуванням називається процес розділення сипкої суміші на окремі фракції.

Залежно від властивостей компонентів, що розділяються розрізняють такі методи розділення:

- за розмірами частинок з використанням ситових машин;
- за формою частинок за допомогою трієрних машин;
- за швидкістю осадження частинок в рідкому і газовому середовищі;
- за електромагнітними властивостями з використанням сепараторів з електромагнітами;
- електростатичний метод;
- флотация.

Розділення за розмірами частинок називають просіюванням. Воно полягає в тому, що сипка суміш подається на сита, отвори яких пропускають

частину суміші (її називають проходом), а іншу частину (залишок) затримують.

Сита класифікують за матеріалом та способом виготовлення:

- а) пробивні із тонкої листової сталі із штампованими отворами;
- б) плетені з круглого металевого дроту;
- в) ткані з шовкових, капронових і нейлонових ниток.

Основною характеристикою сит є величина φ , яка називається живим перерізом сита. Живий переріз сита визначають за формулою:

$$\text{для пробивних} \quad \varphi = \frac{F_0}{F} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

де F_0 – площа отворів сита; F – загальна площа сита;

для дротяного сита з квадратними отворами:

$$\varphi = \frac{D^2}{(D + \Delta)^2} \cdot 100\% , \quad (2.2)$$

де D – розмір сторони отвору; Δ – товщина дроту;

для плетеного сита:

$$\varphi = \frac{D_1 \cdot D_2}{(D_1 + \Delta_1) \cdot (D_2 + \Delta_2)} \cdot 100\% , \quad (2.3)$$

де D_1 – відстань між нитками по основі; Δ_1 – товщина нитки по основі; D_2 – відстань між нитками по утку; Δ_2 – товщина нитки по утку.

Ситовий аналіз проводиться з метою визначення фракційного складу сипкої суміші.

Ситовий аналіз сипкої суміші проводять з використанням механічного розсіву (рис. 2.1) або вручну. При цьому наважку сипкої суміші пропускають через набір сит, встановлених одне над одним. Розмір отворів цих сит поступово зменшується від верхнього сита до нижнього.

Після просіювання через сита зважують кожну фракцію, що залишилась на тому чи іншому ситі. Таким чином визначають масу залишку або сходу та процентний вміст кожної фракції у загальній масі всієї суміші:

$$a = \frac{m_i}{m} \cdot 100\% , \quad (2.4)$$

m_i – маса i -тої фракції.

m – загальна маса суміші.

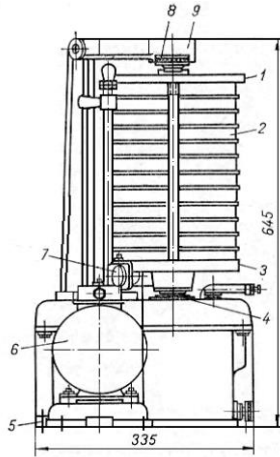


Рисунок 2.1 – Схема механічного розсіву:

1 – кришка; 2 – набір сит; 3 – столик; 4 – вал привода; 5 – станина;
6 – електродвигун; 7 – куліса; 8 – гвинт кріплення; 9 – ударний важіль

За отриманими даними будують графік ситового аналізу. По осі абсцис відкладають розміри отворів сита , по осі ординат – процентний вміст кожної фракції.

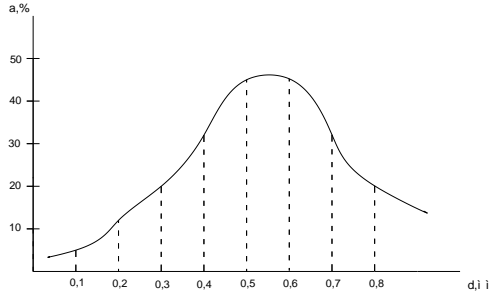


Рисунок 2.2 – Приклад графіка ситового аналізу

Отримана крива характеризує фракційний склад сипкої суміші. При просіюванні зернистого матеріалу через сита не всі зерна, розмір яких менший розміру отвору сит , поводять через отвори. Ефективність просіювання характеризується коефіцієнтом корисної дії сита:

$$\eta = \frac{m}{m_i} \cdot 100\% , \quad (2.5)$$

m – кількість зерна , яке пройшло через сито;

m_i – кількість зерна того ж розміру у всій фракції.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Відважують наважку подрібненого зерна пшениці масою 300 г.
2. Складають набір із 6-7 сит з отворами різного розміру, які поступово зменшуються від найбільшого до найменшого.
3. На верхнє сито засипають наважку подрібненого зерна, закривають кришкою, закріплюють на вібраційному розсіві. Вмикають вібраційний розсів та просіюють суміш протягом 5-7 хв.
4. Знімають набір сит з розсіву та зважують схід з кожного сита.

Отримані результати заносять в таблицю.

Розмір отвору сита, мм						
Маса фракції, г						
Процентний вміст фракції в суміші, %						

5. За даними таблиці будують графік ситового аналізу наважки подрібненого зерна (пшениці, жита, ячменю, вівса).

Контрольні запитання

1. Що таке сортування сипкої суміші? Назвіть основні методи розділення.
2. В чому полягає суть процесу просіювання?
3. Класифікація сит, їх основні параметри.
4. З якою метою проводять ситовий аналіз?

Лабораторна робота №3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ

Мета роботи: Вивчити будову та принцип роботи шнекового олійного преса. Дослідити процес пресування олійного матеріалу з використанням шнекового олійного пресу.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Пресуванням називають механічний процес, який полягає у тому, що матеріал піддається зовнішньому тиску за допомогою спеціальних механічних пристроїв.

Віджим рідини пресуванням застосовують у виноробстві та консервному виробництві для виділення соків з винограду, плодів і ягід; в оліє-жировому виробництві – рослинної олії з насіння, у бурякоцукровому

виробництві – води з бурякового жому, при виробництві жиру його відділяють від шкварок, при виробництві сиру сироватку відділяють із сирної маси. Віджимання інколи використовують для попереднього виділення вологи з матеріалів, які подають потім на сушіння, оскільки механічне відділення вологи завжди дешевше, ніж теплове. Основною величиною, що характеризується процес віджимання пресуванням, є вихід рідини, що залежить від величини робочого тиску, характеру зв'язку рідкої фази з клітинною структурою, вмісту рідкої фази у вихідному матеріалі та залишку, температури процесу, товщини шару і тривалості процесу.

Шнекові преси відносяться до машин безперервної дії. Пресуюче зусилля у шнековому пресі створюється одним чи декількома шнеками, які переміщують матеріал.

Принцип роботи шнекових пресів. При обертанні шнекового валу в порожнині зерного барабана (тобто барабана, зібраного з пластин з малими зазорами між ними) відбувається транспортування матеріалу від місця завантаження до виходу. У результаті зменшення вільного об'єму витків за ходом руху матеріалу внаслідок зменшення кроку і збільшення діаметра тіла витка матеріал піддається стиску. При цьому в матеріалі виникає тиск, який віджимає олію з мезги, яка проходить через зазори зерного барабана і збирається у піддоні. Віджатиї матеріал (макуха) на виході з барабана зустрічається з пристроєм, який регулює переріз вихідної щілини і, тим самим, протитиск у всьому шнековому тракті преса. Максимальний тиск, що розвивається шнековим пресом, досягає до 30 МПа, ступінь ущільнення (стиску) мезги зростає у 2,8..4,4 рази, тривалість перебування мезги в шнековому каналі під тиском залежить від типу преса і коливається у межах 78...225 с.

Шнековий прес для віджимання олії із насіння соняшника представлений на рис. 3.1.

Шнековий прес складається з горизонтального корпусу 2, у якому розташований перфорований циліндр 1, всередині якого міститься шнек 3 із змінним кроком. Вихідний отвір преса закривається конусом 5, положення якого регулює ширину кільцевого проміжку, а отже, і ступінь віджимання рідини.

Віджимання рідини з матеріалу у шнековому пресі відбувається в результаті поступового ущільнення маси матеріалу між витками шнека за рахунок зменшення кроку витків, механічної дії витків на матеріал в процесі обертання шнека; тертя пресованого матеріалу об поверхню витків, стінки циліндра і частинок матеріалу між собою; опору пристрою, що регулює величину вихідного отвору для ущільненого залишку.

Вихід рідини та його якість залежать від ступеня стиснення матеріалу між витками шнека. Ступінь стиснення характеризується коефіцієнтом стиснення:

$$k=V_1/V_2 \quad (3.1)$$

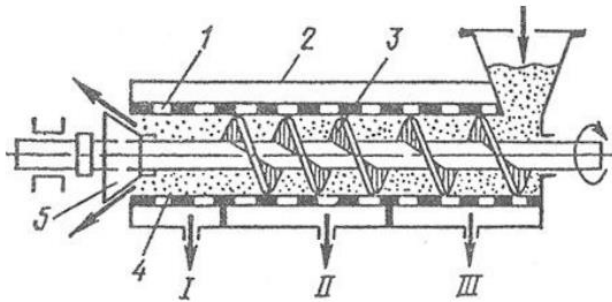


Рисунок 3.1 – Схема шнекового преса:

1 – перфорований циліндр; 2 – корпус; 3 – шнек; 4 – камера стиснення (пресова камера); 5 – конус.

де V_1 – об’єм матеріалу в першому витку шнека; V_2 – об’єм залишку в останньому витку шнека.

Масову продуктивність шнекових пресів можна визначити за формулою:

$$Q_m = S \cdot v \cdot \rho \cdot \varphi, \quad (3.2)$$

де S – площа поперечного перерізу внутрішньої порожнини камери пресування у місці розміщення першого витка шнека, що зайнята продуктом; ρ – щільність матеріалу, що пресується; φ – коефіцієнт заповнення порожнини камери сировиною.

ОПИС ЛАБОРАТОРНОГО ШНЕКОВОГО ПРЕСА

Лабораторний олійний шнековий прес зображено на рис. 3.2. Він складається із завантажувальної горловини 1, пресуючого шнека 2, патрубку для відведення олії 3, панелі управління пресом 4, нагрівального елемента 5 та щілини для відведення шроту 6.

Лабораторний шнековий прес працює від джерела електричного струму напругою 220 В. На панелі управління шнековим пресом встановлюють визначені режими пресування залежно від матеріалу, який пресується.

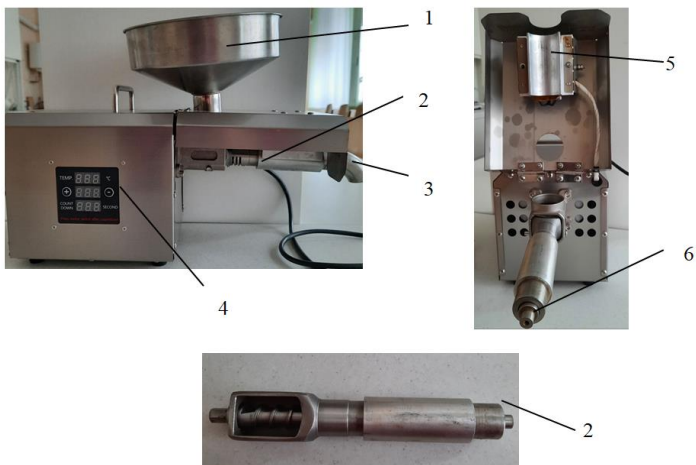


Рисунок 3.2 – Олійний прес:

1 – завантажувальна горловина; 2 – пресуючий шнек; 3 – патрубок для відведення олії; 4 – панель управління; 5 – нагрівальний елемент; 6 – щілина для відведення шроту

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Зважують наважку олійного матеріалу (насіння соняшнику, льону, гірчиці).
2. Вмикають олійний прес, встановлюють визначену частоту обертання шнека залежно від матеріалу, який пресується.
3. Засипають наважку олійного матеріалу у завантажувальну горловину олійного преса.
4. Зважують олію, що виділилась при пресуванні та визначають відсоток виходу олії.
5. Після виходу олійного матеріалу з завантажувальної горловини і робочої камери зупинити прес.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ

Визначити теоретичну продуктивність преса по насінню, кг/год. за формулою:

$$Q_T = 47,1 \cdot D_3^2 \cdot L \cdot (1 - \varphi) \cdot \rho \cdot n(1 - k_{\text{пр}}) \quad (3.1)$$

де D_3 – зовнішній діаметр шнека, м (визначається вимірюванням);
 L – довжина витка шнека, м (визначається вимірюванням);
 n – частота обертання шнека, об/хв (з технічної характеристики);

ρ – об’ємна маса насіння, кг/м³ (соняшник – 400...440 кг/м³, кукурудза – 680...700 кг/м³, ріпак – 656...682 кг/м³; льон – 1215 кг/м³);

φ – коефіцієнт заповнення, $\varphi = 0,287...0,550$;

k_n – коефіцієнт повернення, $k_n = 0,728...0,716$.

Розрахувати потужність, необхідну для пресування насіння:

$$P = \frac{b \cdot Q_1 \cdot n}{e^{0,022w \cdot \rho v}} \cdot (\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{пр} 6,5} - 1), \quad (3.2)$$

де Q_1 – кількість насіння, що поступає у прес за 1 оберт шнека, кг;

b – коефіцієнт, який враховує температуру насіння та його вологість, $b = 0,001$;

w – вологість насіння, $w = 14... 16$ %;

$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{пр}}$ – практичний ступінь стиску насіння у пресі;

v – швидкість проходження олії, м/с; $v = 0,6... 1,0$ м/с.

Рівняння для практичного ступеня стиску по насінню у пресі:

$$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{пр}} = 0,97 [\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{т}} - (21,8 - 1,16\delta)], \quad (3.3)$$

де δ – ширина вихідної щілини, при якій працює прес, мм;

$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{т}}$ – теоретичний ступінь стиску насіння у пресі (табл. 3.1).

Визначити очікуваний вихід олії на пресі B , %:

$$B = (M_2 / M_1) 100\%, \quad (3.4)$$

де M_1 – маса наважки насіння, г;

M_2 – маса олії яка виділилась, г;

Таблиця 3.1 – Розрахунковий ступінь стискання насіння у пресі

Ширина вихідної щілини, мм	12	10	8	6
Ступінь стискання	13,1	15,75	17,6	23,3

Результати розрахунків занести в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати проведеного дослідження

Вид насіння	Маса наважки насіння, г	Маса олії, г	Параметри шнека			Продуктивність, кг/с	Вихід олії, %
			діаметр D_3 , мм	довжина L , мм	Частота обертання		

Контрольні запитання

- 1.Що таке пресування?
- 2.Яка величина характеризує процес відтискання пресуванням?
- 3.Як визначають коефіцієнт стиснення матеріалу?
- 4.Охарактеризуйте будову шнекового олійного пресу.
- 5.В чому полягає принцип роботи шнекового олійного пресу?

Лабораторна робота №4 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНОЇ МІШАЛКИ

Мета роботи: Дослідити ефективності перемішування різними типами мішалок. Розрахувати критерій Рейнольдса для мішалок різних типів. Визначити потужність, що споживається мішалками, і потужність електродвигуна, який обертає мішалку.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Перемішуванням називається процес взаємного переміщення частинок однієї речовини в іншій з метою їх рівномірного розподілу за всім об'ємом, який перемішується.

У харчовій промисловості перемішування матеріалів застосовується для здійснення наступних технологічних процесів:

- приготування розчинів;
- приготування емульсій та суспензій;
- інтенсифікація теплових, хімічних і біохімічних процесів;
- обробка продуктів з метою надання їм визначеної консистенції;
- проведення фізико-хімічних процесів, наприклад, сатурації, кристалізації;

- підігрівання рідкої системи у випадку подачі в неї гострої пари;

Перемішування здійснюється у спеціальних машинах, які називаються змішувачами (мішалками), або безпосередньо в апаратах, де відбуваються масообмінні, теплообмінні, хімічні, біохімічні процеси, що обладнуються пристроями для перемішування – мішалками.

Машини і апарати для перемішування рідких харчових продуктів широко застосовується в кондитерській, хлібопекарній, макаронній, виноробній, вітамінній, пивоварній та інших галузях харчової промисловості.

Рідкі харчові продукти перемішують механічним способом, в трубопроводах, циркуляцією або стиснутим повітрям.

Механічні мішалки, які застосовуються в харчових виробництвах, можуть бути розділені на три основні групи: лопатеві, пропелерні і турбінні. Залежно від характеру створеного ними потоку механічні мішалки є з тангенціальним, радіальним, осьовим і змішаним потоком рідини.

Перемішування характеризується якістю, інтенсивністю та енергією, яка витрачається на проведення цього процесу.

Якість перемішування визначається однорідністю систем, що отримуються, а також збільшенням швидкості протікання процесів при наявності перемішування у порівнянні із швидкістю без нього.

Інтенсивність перемішування характеризується відцентровим критерієм Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot n \cdot d^2}{\mu}, \quad (4.1)$$

де n – швидкість обертання мішалки, об./с;

d – діаметр окружності, що описується кінцями лопаток мішалки, м;

μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с;

ρ – густина рідини, що перемішується, кг/м³.

Робочу потужність, яку споживає мішалка, можна визначити за формулою:

$$N_{\text{міш.}} = c d^{5-2m} \cdot n^{3-m} \cdot \rho^{1-m} \cdot \mu^m \quad (4.2)$$

де ρ – в'язкість рідини, кг/м³;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості рідині, Па·с;

c, m – константи, що мають певні чисельні значення для мішалок різних типів.

Значення c і m для найбільш поширених типів мішалок наведені в табл., де зазначені також відношення D/d , h_3/d і h_1/d , де D – внутрішній діаметр посудини; h_3 – рівень рідини в посудині; h_1 – відстань між нижньою крайкою лопатки і дном посудини.

Розрахункова потужність (Вт), споживана мішалкою при сталому режимі:

$$N_{\text{міш.}} = K_N \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5, \quad (4.3)$$

де K_N – критерій потужності, або коефіцієнт опору;

ρ – густина продукту, що перемішується, кг/м³;

n – частота обертання валу мішалки, об/с;

d – зовнішній діаметр мішалки, м.

Якщо мішалка, для якої визначається робоча потужність, не подібна геометрично мішалкам, для яких зазначені в літературі величини констант c і m , то обчислену за рівнянням (5.2) потужність треба помножити на коефіцієнт K_N , розрахований за рівняннями:

для лопатевих мішалок

$$K_N = (D/3d)^{1.1} \cdot (h_3/D)^{0.6} \cdot (4h/d)^{0.3} \quad (4.4)$$

де h – висота лопатки мішалки, м;

для турбінних мішалок

$$K_N = (D/3d)^{0.93} \cdot (h_3/D)^{0.6} \quad (4.5)$$

Потужність двигуна розраховують за формулою:

$$N_{\text{дв.}} = N_{\text{міш.}} / \eta \quad (4.6)$$

де η - коефіцієнт корисної дії. Для типів мішалок, що досліджуються в роботі, прийняти рівним 0,75.

ОПИС ВКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Схема експериментальної установки зображена на рис. 4.1. Установка складається з посудини 1, всередині якої розташовуються вал 2 із зйомники мішалками 3. Вал приводиться в рух за допомогою приводу 4.

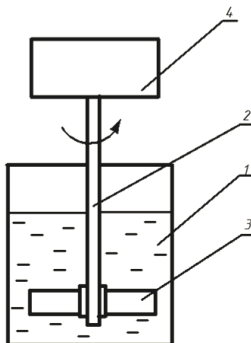


Рисунок 4.1 – Схема експериментальної установки

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Налити в посудину води і поміряти її температуру.
2. Визначити діаметр мішалки, що досліджується, внутрішній діаметр посудини, рівень води в посудині (після занурення мішалки) і відстань між нижнім краєм лопати і дном посудини.
3. Додати до води речовину, що буде змішуватись з водою, встановити мішалку, з'єднати її з електродвигуном, а останній підключити до джерела електроенергії.
4. Регулюючи напругу, встановити певну кількість обертів мішалки за певний час і визначити швидкість обертання (об/с).
5. Зважити певну кількість речовини (кухонної солі) і засипати її у посудину з мішалкою, що обертається. Одночасно помістити у ємність, що сполучається з основною, ареометр і записати його показання.
6. Проводити заміри густини розчину щохвилини, записуючи дані в таблицю 5.1. Припинити дослід, коли три послідовно зняті заміри будуть однаковими.
7. Аналогічні досліди виконати з іншим типом мішалки.

Таблиця 4.1 Результати вимірювань

№ п/п	Тип мішалки	Температура, °С	Маса речовини, кг	Діаметр мішалки, м	Діаметр посудини, м	Рівень води в посудині, м	Відстань між нижнім краєм лопаті і дном посудини, м	Густина, кг/м ³	Критерій Рейнольдса	Потужність мішалки, Вт

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИПРОБУВАННЯ

1. За формулою (5.1) розрахувати значення критерію Рейнольдса.
2. Перевірити геометричну подібність мішалки, що використовується в роботі, тій, для якої наведені в літературі значення s і m . Для цього визначити відношення D/d , h_3/d і h_1/d . Якщо ці відношення не відповідають наведеним у таблиці, розрахувати за формулами (5.3) або (5.4) коефіцієнт K .
3. Розрахувати робочу потужність мішалки і електродвигуна за формулами (5.2) і (5.5).
4. За залежністю $\rho=f(\tau)$ для різних типів мішалок визначити, яка з них є ефективнішою для даного процесу.

Контрольні питання

1. Яке практичне значення процесу перемішування?
2. Чим відрізняється звичайний критерій Рейнольдса від відцентрового?
3. Які найбільш поширені типи мішалок можете навести?
4. Як визначають потужність на валу мішалки?

Лабораторна робота №5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТОЮВАННЯ

Мета роботи: Ознайомлення з будовою та роботою відстійника безперервної дії, вивчення основних закономірностей та рівнянь, що використовуються при розрахунках процесу, визначення швидкості відстоювання, діаметру частинок, що осідають у відстійнику, та продуктивності апарату.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Осадження – процес розділення, при якому зважені в рідині чи газі тверді частинки відділяються від суцільної фази під дією сил тяжіння, сил інерції чи електростатичних сил. Осадження, яке проходить під дією сил тяжіння, називається відстоюванням. Відстоювання відбувається під дією сил тяжіння; використовується для поділу пилу, суспензій, емульсій. Цей процес не забезпечує витягання тонкодисперсних частинок і характеризується невеликою швидкістю, тому його використовують для часткового, або попереднього, розділення. Перевагами процесу є простота обладнання та невеликі енергетичні затрати на його проведення.

Розглянемо процес осідання частинки у в'язкому середовищі (рис. 5.1) і виведемо рівняння для визначення швидкості осідання.

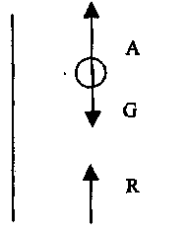


Рисунок 5.1 – Схема сил, що діють на частинку, яка осідає

Частинка, яка поміщена в середовище, спочатку рухається прискорено, але із збільшенням швидкості зростає опір середовища, що приводить до зменшення рівно дійної сили, яка діє на частинку. Наступає момент часу, коли рівнодійна сил стане рівна нулю і частинка буде рухатися рівномірно з постійною швидкістю, яка буде максимальною. Період прискореного руху невеликий, тому можна вважати, що частинка рухається з постійною швидкістю. Для цього випадку можна записати рівняння рівнодії сил:

$$G = A + R, \quad (5.1)$$

де G - сила тяжіння, Н;

A - підйомна сила, Н;

R - сила опору, Н.

Для частинок кулястої форми:

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c g; \quad (5.2)$$

$$A = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c g \quad (5.3)$$

$$R = \xi \rho_{cp} \frac{\pi d^2 v^2}{8}, \quad (5.4)$$

де d - діаметр частинки, м;

ρ_z, ρ_c - густина частинки і середовища, кг/м³;

ξ - коефіцієнт опору середовища, який залежить від режиму руху частинки;

v - швидкість руху частинки, м/с.

Підставивши значення сил (5.2), (5.3), (5.4) у рівняння рівноваги (5.1), будемо мати:

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_z g = \frac{\pi d^3}{6} \rho_c g = \xi \rho_c \frac{\pi d^2 v^2}{8} \quad (5.5)$$

Розв'язавши рівняння відносно швидкості відстоювання, отримаємо:

$$v^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_z - \rho_c)}{\xi \rho_c} \quad (5.6)$$

Приведемо отримане рівняння до безрозмірного виду, розділивши обидві частини на v^2 . Після скорочення однакових величин рівняння буде мати вигляд:

$$1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_z - \rho_c)gd}{\xi \rho_c v^2}.$$

Щоб в правій частині рівняння виключити швидкість осадження, ліву і праву частини рівняння помножимо на величину Re^2 . Тоді рівняння набуде вигляду:

$$Re^2 = \frac{4}{3\xi} \cdot \frac{(\rho_z - \rho_c)gd}{\rho_c v^2} Re^2. \quad (5.7)$$

Для випадку обтікання кулястої частинки середовищем критерій Рейнольдса запишемо наступним виразом:

$$Re = \frac{vd\rho_c}{\mu_c}, \quad (5.8)$$

де v – швидкість обтікання (рівна швидкості осадження частинки), м/с;

d – діаметр частинки, м;

μ_c – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Підставивши значення критерій Рейнольдса в праву частину рівняння (5.7), отримаємо:

$$Re^2 = \frac{4}{3\xi} \cdot \frac{(\rho_z - \rho_c)gd}{\rho_c} \cdot \frac{v^2 d^2 \rho_c^2}{\mu_c^2}.$$

Скоротивши однойменні величини, будемо мати:

$$Re^2 = \frac{4}{3\xi} \cdot \frac{(\rho_z - \rho_c)gd^3 \rho_c}{\mu_c}. \quad (5.9)$$

Комплекс величин $\frac{(\rho_z - \rho_c)gd^3 \rho_c}{\mu_c}$ є критерієм Архімеда Ar ; в нього

входять величини, які не залежить від швидкості, тому його можна розрахувати за даними про фізичні характеристики середовища і частинки. Підставимо значення критерію Архімеда в рівняння (5.9) і отримаємо:

$$Re^2 = \frac{4}{3\xi} Ar \quad (5.10)$$

Рівняння (4.10) є критеріальним рівнянням для частинок, які осаджуються. Оскільки коефіцієнт опору ξ залежить від критерію Рейнольдса:

$$\xi = \frac{B}{Re^z} \quad (5.11)$$

то підставивши значення коефіцієнта опору в рівняння (5.10), матимемо:

$$Re^2 = \frac{4Re^z}{3B} Ar \quad \text{або} \quad Re^{2-z} = \frac{4}{3B} Ar \quad (5.12)$$

Знайдемо корінь степені $2-z$ з лівої і правої частин рівняння і отримаємо:

$$Re = \left(\frac{4}{3B} \right)^{\frac{1}{2-z}} Ar^{\frac{1}{2-z}} \quad (5.13)$$

де B і z - константи.

$$\text{Замінімо значення: } \left(\frac{4}{3B} \right)^{\frac{1}{2-z}} = k \quad \text{і} \quad \frac{1}{2-z} = m,$$

де k і m - константи.

Тоді рівняння (5.13) матиме вигляд:

$$Re = k \cdot Ar^m. \quad (5.14)$$

Основною величиною при розрахунках відстійників є швидкість осадження. Визначення швидкості осадження кулеподібних поодиноких частинок у нерухомому необмеженому середовищі здійснюють таким чином.

Визначають критерій Архімеда:

$$Ar = Ga \frac{\Delta\rho}{\rho_c} = \frac{Re^2}{Fr} \frac{(\rho - \rho_c)}{\rho_c} = \frac{d^3(\rho - \rho_c)\rho_c g}{\mu_c^2}, \quad (5.15)$$

де $Ga = Re^2/Fr$ – критерій Галілея.

Для осадження в газовому середовищі:

$$Ar = \frac{d^3 \rho \rho_c g}{\mu_c^2}. \quad (5.16)$$

За знайденим значенням критерію Ar визначають критерій Re або критерій Ляшенка Lu :

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{\omega_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g}, \quad (5.17)$$

де ω_{oc} – швидкість осадження частинок.
або (якщо середовище – газ)

$$Ly = \frac{\omega_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c g \rho}. \quad (5.18)$$

Далі обчислюють швидкість осадження:

$$\omega_{oc} = \frac{Re \mu_c}{\rho_c d}, \quad (5.19)$$

або

$$\omega_{oc} = \sqrt[3]{\frac{Ly \mu_c (\rho - \rho_c) g}{\rho_c^2}}. \quad (5.20)$$

Площа осадження F_{oc} (у m^2) відстійника для суспензій визначається за формулою:

$$F_{oc} = \frac{V}{\omega_{oc}}, \quad (5.21)$$

де V – об'ємна витрата рідини, що проходить через апарат, m^3/c ;

ω_{oc} – дійсна швидкість осадження частинок, m/c .

Відношення дійсної швидкості щільного осадження частинок ω_{oc}' до швидкості осадження поодинокій частинки ω_{oc} залежить від об'ємної концентрації суспензії.

При орієнтованих розрахунках, з огляду на відмінність реальних умов осадження від теоретичних (скрутість осадження, форма частинок, рух середовища), дійсну швидкість часто приймають рівній половині теоретичної швидкості осадження поодинокій кулеподібної частинки:

$$\omega_{oc}' = 0,5 \omega_{oc}.$$

ОПИС ВКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

На рис. 5.2 зображена схема установки. Вона складається з декількох відстійних прозорих циліндрів 1, які заповнюються рідиною, на циліндри нанесені мітки 2 для реєстрації початку і закінчення відстоювання. Діаметр циліндрів довільний, але таким, щоб стінки не впливали на осадження кульок. Від висоти циліндрів залежить точність проведення досліду, тому краще їх взяти довшими. Для дослідів краще застосувати в'язкі рідини; соняшникову олію, гліцерин, тоді легше фіксувати час відстоювання. Діаметр кульок

можна встановити за допомогою штангенциркуля або мікрометра, масу – аналітичних ваг.

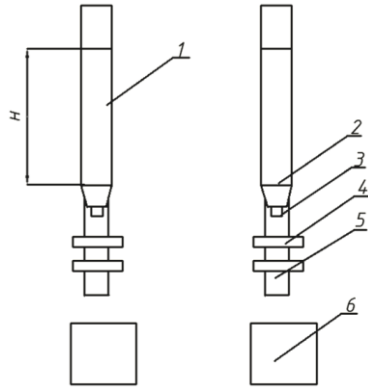


Рисунок 5.2 – Схема експериментальної установки для проведення процесу відстоювання

Кульки опускають через верх циліндра, і вони накопичуються в нижній його частині. Після проведення досліду кульки вивантажують через гумовий шланг, для чого відкривають затискач 4, щоб кульки опустились в шланг. Потім перетискають цим самим затискачем шланг і відкривають затискач 5. Кульки опускаються в ємкість б разом з частиною рідини.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. У відстійні циліндри заливають рідини таким чином, щоб їх рівень був вище мітки.
2. Вимірюють температуру рідини. Якщо рідина довгий час знаходилась в циліндрах, то її можна вважати рівною температурі приміщення.
3. Вибирають кульки різного діаметру і виготовлені з різного матеріалу. Визначити діаметри і масу кульок.
4. Розрахувати густину матеріалу кульок. Дані розрахунків занести в таблицю 5.1.

ОБРОБКА ДОСЛІДНИХ ДАНИХ

1. Густина рідин і коефіцієнти в'язкості знаходять з довідкових даних для замірної температури.
2. Визначають густину матеріалу за формулою:

$$\rho_z = \frac{m \cdot 6}{\pi \cdot d^3}, \quad (5.22)$$

де m – маса кульки, кг;

d – діаметр кульки, м.

Таблиця 5.1 – Результати дослідів

№ п/п	Рідина				Кулька		Відстань між мітками циліндра	Тривалість осадження, с	Швидкість осадження	Re	Ar
	Назва	Температура, °С	Густина, кг/м ³	Коефіцієнт в'язкості, Па·с	Діаметр, м	Густина матеріалу, кг/м ³					

3. Розраховують швидкість осадження:

$$v = \frac{H}{\tau}, \quad (5.23)$$

де H - відстань між мітками відстійного циліндра, м;

τ - тривалість осадження, с.

4. Розраховують критерій Архімеда за рівнянням:

$$Ar = \frac{(\rho_s - \rho_c)gd^3\rho_c}{\mu_c^2}. \quad (5.24)$$

5. Визначають критерій Рейнольдса за формулою (5.8).

6. Логарифмують критеріальне рівняння осадження (5.14) і отримують:

$$lgRe = lgk + mlgAr.$$

7. На міліметровому папері будують графік $lg Re = f(lg Ar)$. Через точки на графіку проводять пряму. Приклад побудови показано на рис. 5.3.

8. З графіка знаходять величини $lg k$ і $m = tg \beta$, а $lg k$ дорівнює відрізу, який відтинає пряма на осі ординат. Визначають коефіцієнт k.

9. Визнають коефіцієнт опору з рівняння (5.10).

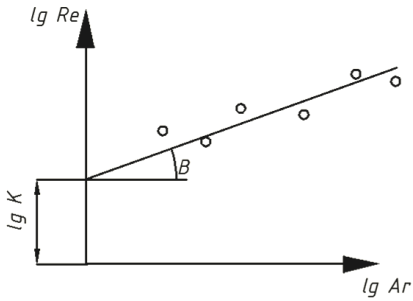


Рисунок 5.3 – Графік залежності $\lg Re$ від $\lg Ar$

Контрольні запитання

1. За рахунок якої сили здійснюється відстоювання у відстійнику?
2. Що таке неоднорідні системи і як вони класифікуються?
3. У яких випадках неможливо розділити неоднорідну систему відстоюванням?
4. Чому осадження частинок проходить в основному з постійною швидкістю?
5. На якій основі використовується рівняння рівноваги сил для визначення швидкості осадження частинок?

Лабораторна робота №6 ВИВЧЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ

Мета роботи: Вивчити процес сушіння в атмосферній конвективній повітряній циркуляційній сушарці при атмосферному тиску. Побудувати криву сушіння.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Сушіння – один з найпоширеніших способів видалення вологи з вологих матеріалів. У харчовій промисловості сушіння застосовують у цукровій, вітамінній, спиртовій та інших галузях промисловості. За способом підведення тепла до матеріалу розрізняють наступні види сушіння:

- *конвективне* – шляхом безпосереднього дотикання матеріал, який висушується з сушильним агентом;
- *контактне* – шляхом передачі тепла від теплоносія до матеріалу через стінку, що їх розділяє;
- *радіаційне* – шляхом передачі тепла інфрачервоними променями;
- *діелектричне* – шляхом нагрівання в полі струмів високої частоти;

– *сублімаційне* – сушіння в замороженому стані при глибокому вакуумі.

Найпоширенішим у харчових виробництвах є конвективне сушіння нагрітим повітрям. У повітряній циркуляційній сушарці волога і матеріал контактує з нагрітим повітрям. Випаровування вологи починається з поверхні висушуваного матеріалу. Пара, по утворюється, дифундує крізь плівку повітря, яке оточує поверхню матеріалу, в навколишнє середовище. Внаслідок цього в матеріалі виникає різниця концентрацій вологи, і вона переходить з внутрішніх шарів на поверхню.

Спочатку волога внутрішніх шарів надходить на поверхню в достатній кількості. У цей період швидкість сушіння (кількість випареної вологи за одиницю часу з одиниці поверхні) залишається сталою і не залежить від вологовмісту матеріалу. Протягом періоду сталої швидкості процес сушіння визначається швидкістю дифузії випареної вологи крізь плівку насиченого повітря, тобто зовнішніми умовами. Через те цей період називають періодом «зовнішньої дифузії».

Коли вологи, що надходить до поверхні висушуваного матеріалу, стає менше від тієї кількості, яка може випаруватись, швидкість сушіння починає зменшуватись. Це відповідає критичному вологовмісту матеріалу.

Період зменшення швидкості сушіння триває доти, поки матеріал не досягне вологовмісту, що називається рівноважним. У цей момент вологовміст повітря в плівці над матеріалом стає рівним вологовмісту в повітрі, що оточує матеріал. Подальше сушіння за таких умов стає неможливим. У період зменшення швидкості процес сушіння залежить від швидкості, з якою волога дифундує до поверхні матеріалу, тобто обумовлюється «внутрішньою дифузиею».

Залежність швидкості сушіння від часу (крива сушіння) наведено на рис. 6.1. Ділянка I характеризує випаровування вологи з повністю змоченої вологою поверхні, ділянка II – з поверхні після утворення на ній сухих ділянок; ділянка III – з поверхні, коли вся волога випарувалась і процес сушіння залежить тільки від швидкості дифундування вологи до поверхні.

Для різних матеріалів вигляд кривої швидкості сушіння різний і залежить від форм зв'язку вологи з матеріалом та умов сушіння.

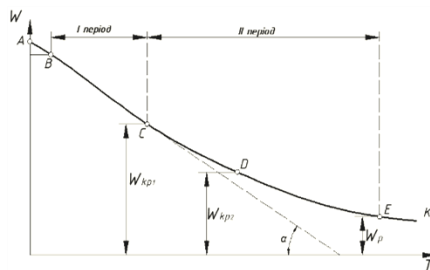


Рисунок 6.1 – Крива сушіння

Сушіння під вакуумом застосовують у ряді харчових виробництв, наприклад у цукро-рафінадній і молочно-консервній промисловостях. У багатьох випадках цей метод має істотні переваги перед сушінням нагрітим повітрям і топковими газами, а саме:

а) сушіння йде швидше, ніж в атмосферних сушильних установках (за інших однакових умов), оскільки із зменшенням тиску під час сушіння встановлюється підвищена різниця пружності пари вологи и над матеріалом і в навколишньому середовищі;

б) сушіння йде при низьких температурах;

в) можливе вловлювання цінних розчинників;

г) сушіння не залежит від атмосферних умов, отже, можна цілком видалити вологу з матеріалу;

д) наявність герметично закритої системи дає можливість створити стерильне середовище, що оберігає висушуваний матеріал від забруднення;

є) шкідливі гази і пара з сушильної установки не виділяються в навколишнє

повітря, що особливо важливе при сушінні отруйних продуктів.

Сушіння під розрідженням можливе в сушильних установках періодичної і безперервної дії.

ОПИС УСТАНОВКИ

Сушильна установка (рис. 9.1) складається з основи 4 у якій міститься калорифер та вентилятор, п'яти змінних касет 5, регулятора температури 3, кнопки вмикання/вимикання 2 та кришки 1.





Рисунок 9.1 – Сушильна установка для визначення зміни вологості матеріалу

1 – кришка; 2 – кнопка вмикання/вимикання; 3 – регулятор температури; 4 – основа; 5 – набір змінних касет.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Відсортовану партію яблук мити проточною водою; звільнити від насіннєвого гнізда, за допомогою пристрою для нарізання яблук нарізати на пластинки товщиною 4 – 6 мм і рівномірно розкласти на касети тонким шаром і зважити.

2. Касети вертикально розташовують у сушильній шафі, розігрітій до температури 60 °С; температуру підтримували постійною протягом всієї тривалості процесу сушіння. Відстань між касетами становила (35 ± 1) мм.

3. Через кожні півгодини фіксувати масу досліджуваних зразків за допомогою аналітичних ваг (рис. 3.2.).

4. Повторювати відповідні операції для наступних партій яблук відповідно при температурах $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, $(50 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, $(70 \pm 2)^{\circ}\text{C}$.

5. За отриманими даними визначити вологість фруктів, побудувати криві сушіння і провести порівняльний аналіз швидкості сушіння зразків.

ОБРОБКА ДОСЛІДНИХ ДАНИХ

1. Зменшення ваги вологи у стовпці 5 звітної таблиці 9.1 визначають як різницю у попередньому і даному рядках у стовпці 4 (кількість сухої речовини залишається незмінною). Маса вологи в стовпці 6 визначається як різниця між загальною масою вологи і зменшенням її в колонці 5.

2. Вологоміст матеріалу, %, в стовпці 7 визначають як відношення маси вологи в стовпці 6 до маси абсолютно сухих речовин в матеріалі, помножене на 100. Маса абсолютно сухих речовин знаходиться розрахунком з матеріального балансу (задається викладачем). Наприклад, для яблук початкова вологість дорівнює 82...86 % (вміст сухих речовин 14...18 %).

3. Графік залежності вологовмісту матеріалу від часу побудувати за даними стовпців 2 і 7. Криву будують за точками, як осереднену із збереженням її закономірного вигляду.

Таблиця 7.1 – Результати дослідів

№ п/п	Заміряні величини			Розраховані величини		
	Час заміру τ , хв	Темпера- тура t , °C	Покази ваг G_i , г	Зниження ваги вологи $G_e = G_{i-1} - G_i$	Вага вологи G_{wi}	Волого- Вміст W , %

Контрольні питання

1. Які переваги сушіння продуктів під вакуумом?
2. На які періоди поділяють процес сушіння?
3. Які параметри характеризують стан вологого повітря?
4. Яка відмінність між поняттям вологість і вологовміст?
5. Як побудувати графік залежності вологовмісту від часу?
6. Як побудувати графік залежності швидкості сушіння від вологовмісту?
7. Статті надходження і витрат матеріального балансу.
8. Статті надходження і витрат теплового балансу.
9. Як визначають теплові втрати в навколишній простір.

Лабораторна робота №7 ПРОСТА ПЕРЕГОНКА

Мета роботи: Перевірити експериментально диференціальне рівняння простої перегонки.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Перегонка і ректифікація – найбільш розповсюдженні методи розділення рідких однорідних сумішей, які складаються із двох або декількох летких компонентів.

Процес перегонки і ректифікації широко використовують в харчовій промисловості для одержання технічного і харчового етилового спирту, у виробництві ароматичних речовин і ін. Перегонка використовується для грубого розділення сумішей. Для найбільш повного їх розділення застосовується ректифікація.

Процеси перегонки і ректифікації ґрунтуються на різній леткості компонентів суміші при одній і тій самій температурі. Компонент суміші, що

має більшу леткість, називається легколетким, а компонент, що має меншу леткість - важколетким. Відповідно, легколеткий компонент кипить при нижчій температурі, ніж важколеткий, тому їх називають відповідно низькокиплячими і висококиплячими компонентами.

В результаті перегонки чи ректифікації початкова суміш розділяється на дистилят, збагачений легколетким компонентом, і кубовий залишок, збагачений важколетким компонентом. Дистилят одержують в результаті конденсації парів в конденсаторі- дефлегматорі. Кубовий залишок одержують в кубі установки.

Простою перегонкою називається процес часткового розділення суміші рідин шляхом поступового випаровування і безперервного видалення з перегінного апарата утворених парів без їх дефлегмації. На рис.4.2 зображена установка, яка має пристрій 4 для дефлегмації парів, що дає можливість проводити перегонку також і з дефлегмацією.

Під час кипіння суміші вміст більш леткого компонента в парі, а отже і в дистиляті, що утворюється під час конденсації пари, більший ніж у рідині. Завдяки цьому в кубі поступово збільшується відносний вміст менш леткого компонента.

В основу сучасної теорії перегонки покладені закономірності перегонки бінарних сумішей, встановлені Д.П. Коноваловим і М.С. Вревським.

Досліджуючи розчини спиртів і органічних кислот у воді, Коновалов встановив два основних закони, які дають відповіді на питання про склад фаз, що знаходяться в рівновазі.

Перший закон Д.П. Коновалова сформульований так: *„Пара, яка знаходиться в рівновазі з розчином, завжди має в надлишку той компонент, додавання якого до розчину знижує температуру кипіння“.*

Інакше кажучи, пара збагачується тим компонентом, додавання якого до рідини підвищує загальний тиск парів над нею.

Цей закон визначає якісний склад парової фази. Наприклад, в системі „етиловий спирт-вода" додавання до рідкої фази спирту викликає зниження температури кипіння. Отже, при кипінні парова фаза буде збагачуватись парами спирту.

Другий закон Коновалова Д.П. визначає положення на графіку p - x нероздільнокиплячої чи азеотропної суміші, при якій пари, що виділяються, мають той же склад, що і рідка фаза: *„В екстремумах тисків пари (чи точок кипіння) сумішей складу рідкої і парової фаз співпадають“.*

Цей закон встановлює, що якщо на кривій „склад-тиск" є точка перегину, то в цій точці концентрації компонентів в обох фазах будуть однакові. До цієї групи нероздільних сумішей відносяться суміші етилового спирту і води, етилового спирту і бензолу та ін.

Закони, що управляють зміною рівноваги при зміні тиску в системі, встановлені М.С.Вревським, який сформулював два закони.

1. *При підвищенні температури кипіння (тиску) розчину двох рідин, в парах зростає відносний вміст того компонента, випаровування якого потребує більшої затрати енергії.*

2. *При підвищенні температури (тиску) кипіння розчинів, пружність пари яких має максимум, в нероздільнокиплячій суміші зростає відносний вміст того компонента, випаровування якого потребує більшої затрати енергії*

При підвищенні температури кипіння розчинів, пружність пари яких має мінімум, в нероздільно киплячій суміші зростає відносний вміст того компонента, випаровування якого потребує меншої затрати енергії.

Закони М.С. Вревського вказують напрям, в якому змінюється рівновага при зміні тиску в системі. Зокрема для системи „етилловий спирт-вода" вони вказують на те, що із зменшенням тиску при низьких концентраціях спирту в рідині (до 21 % мол.) збільшується вміст води в парах, а при вищих концентраціях спирту в рідині збільшується вміст спирту в парах.

Що стосується азеотропної точки, то зменшення тиску в системі веде до збільшення спирту в нероздільно киплячій суміші. При деякому мінімумі тиску азеотропна точка для цієї суміші зникає і перегонка може дати абсолютний (безводний) спирт.

Склад рідини в перегінному апараті після випаровування деякої її частини і склад дистилляту, що утворюється, можна визначити з матеріального балансу простої перегонки. Оскільки відносний вміст компонентів суміші в перегінному апараті і в дистилляті в процесі перегонки безперервно змінюється, матеріальний баланс складають у диференціальній формі для довільно вибраного моменту.

Введено такі 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: $y = f(x)$.

При випаровуванні 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 подається величиною y , а кількість його – dW .

Матеріальний баланс за легколетким компонентом у цьому випадку можна подати рівнянням:

$$Wx = (W - dW)(x - dx) + Wy, \quad (7.1)$$

або

$$Wx = Wx - dWx - Wdx + dWdx + dWy \quad (7.2)$$

Нехтуючи добутком $dW \cdot dx$, як нескінченно малою величиною другого порядку і перетворюючи останнє рівняння.

Отримаємо:

$$\frac{dW}{W} = \frac{dx}{y-x}. \quad (7.3)$$

Якщо в результаті відгонки деякої визначеної кількості рідини в кубі залишиться W_k 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 до W_n і x_k до x_n і отримаємо:

$$\int_{W_k}^{W_n} \frac{dW}{W} = \int_{x_k}^{x_n} \frac{dx}{y-x} \quad \text{або} \quad \ln \frac{W_n}{W_k} = \int_{x_k}^{x_n} \frac{dx}{y-x} \quad (7.4)$$

Оскільки функціональна залежність $y=f(1/(y-x))$ подається тільки кривою рівноваги даної суміші, то рівняння (8.4) можна розв'язати тільки графічно.

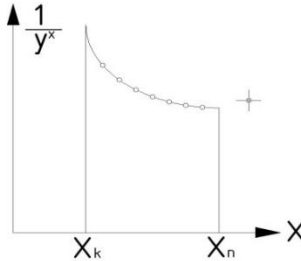


Рисунок 7.1 – Графік функції $y = f\left(\frac{1}{y-x}\right)$

Користуючись кривою рівноваги, будують діаграму (рис.6.1). На осі абсцис відкладають значення x , а на осі ординат-значення $\frac{1}{y-x} = \frac{1}{f(x)-x}$, де y , що відповідає кожному значенню x , визначається за кривою рівноваги для даної суміші.

Площа під кривою між границями x_k і x_n є інтеграл

$$\int_{x_k}^{x_n} \frac{dx}{y-x} = \ln \frac{W_n}{W_k} = A. \quad (7.5)$$

Знаючи величину інтеграла A і кількість початкової суміші W_n можна легко визначити кількість кубового залишку W_k склад якого взято рівним x_k .

Кількість дистилату, що добувається, $W_d = W_n - W_k$ і його склад x_d можна визначити з рівняння матеріального балансу за легколетнім компонентом:

$$W_n \cdot x_n = W_d \cdot x_d + W_k \cdot x_k, \quad (7.6)$$

Звідки

$$x_d = \frac{W_n \cdot x_n - W_k \cdot x_k}{W_d} \quad (7.7)$$

ОПИС УСТАНОВКИ

Експериментальна установка для простої перегонки (рис. 7.2).

Вона складається з перегонного куба 3, який знаходиться в піщаній бані 1, обладнаній електронагрівником 2, пристрою для дефлегмації 4, холодильника 5, кубового-відбірника 6, прийомної колби 7 та термометрів 8, 9.

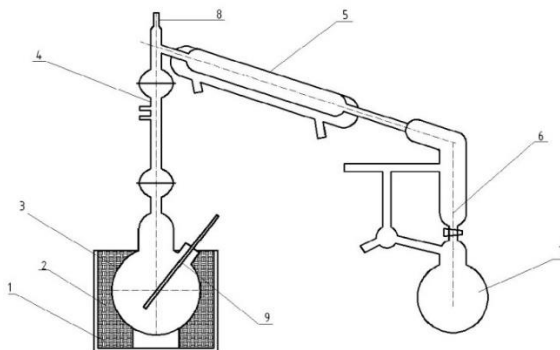


Рисунок 6.2 – Схема установки для простої перегонки

Для дослідження необхідні лабораторний посуд і прилади: два скляних спиртоміри (на 20 °С) з шкалою від 0 до 50 % (об) і від 50 до 100 % (об), спиртові термометри, два мірних циліндри на 500 мл і два на 1000 мл, дві колби місткістю 0,5 і 2 л кожна, міліметровий папір.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Мірним циліндром визначити об'єм водно-спиртової суміші і залити її в куб, попередньо звільнений від рідини. Перед тим визначити вміст

спирту в об'ємних процентах. Концентрацію спирту виміряти спиртоміром з шкалою від 0 до 50% (об) і за допомогою таблиць для визначення вмісту етилового спирту у водно-спиртових сумішах.

2. Заливну горловину куба закрити. Об'єм суміші повинен становити 0,5 л, а міцність 15...20 об. %.

3. Перед початком роботи провести розрахунок процесу перегонки. Для розрахунку приймають: вміст легко леткого компонента (л.л.к) в кубовому залишку ($x_k = 3...5$ об. % при 20°C). За таблицею знаходять значення x_k і y_k у ваг.%. Вибирають 8-10 проміжних значень x (x_1, x_2, x_3 і т.д.), і визначають відповідні значення y (y_1, y_2, y_3 тощо) до x_n та вписують їх у звітну таблицю 8.3.

За знайденими значеннями на міліметровому папері побудувати з урахуванням прийнятого масштабу графік для інтегрування.

Знайшовши в довідковій таблиці густину початкової суміші, визначити її кількість в кілограмах W_n а з рівняння (7.2) – кількість кубового залишку W_k . Кількість дистиляту можна визначити з рівняння:

$$W_d = W_n - W_k.$$

Для визначення вмісту л.л.к. в дистиляті використовують рівняння (8.3). Знаючи величину x_∂ за довідковою таблицею можна визначити густину ρ_∂ об'єм V_d дистиляту.

4. Відкрити кран подачі холодної води в холодильник і в дефлегматор і ввімкнути електронагрівник перегінного куба. При появі перших крапель дистиляту регулювати подачу води таким чином, щоб дистилят виходив з холодильника при температурі 20 °C.

5. Відібравши одержану за розрахунком кількість дистиляту, припинити процес перегонки (електронагрівник слід вимкнути за декілька хвилин до того, як буде відібрана необхідна кількість дистиляту). Після цього з куба 3 в колбу відібрати 150 мл кубового залишку і охолодити його до температури 20°C.

5. Виміряти міцність дистиляту і кубового залишку з урахуванням їх температури, виразити її в масових процентах і порівняти розрахункові значення x_∂ та x_k з одержаними експериментальним шляхом.

Розбіжність розрахункових та дослідних даних не повинна перевищувати 1...2 %.

7. Перекрити воду після охолодження куба.

ПРИКЛАД ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ

Необхідно розділити простою перегонкою водно-спиртову суміш так, щоб в кубовому залишку концентрація спирту становила 5 % (мас.) при температурі 20°C.

1. Визначимо кількість та склад початкової суміші. В циліндр місткістю 500мл заливаємо суміш. Спиртоміром від 0 до 50 % (об.)

визначаємо концентрацію і температуру. Покази спиртоміра 22 % (об.), температура 17 °С.

З таблиці для визначення вмісту етанолу у водно-спиртових сумішах цьому показу спиртоміра відповідає концентрація 23 % (об.) при 20 °С. З таблиці додатку 1 концентрації 23% (об.) відповідає концентрація 18,71% (мас.) і густина 0,97036 г/мл.

Мірним циліндром вимірюємо об'єм початкової суміші, який становить 1500 мл.

Таким чином початкова суміш має:

об'єм $V_n = 1500$ мл;

концентрацію $x_n = 0,1871$;

густину $\rho_n = 0,97036$ г/мл;

маса суміші $W_n = \rho_n \cdot V_n \sim 1455$ г;

маса л.л.к. $P_n = W_n \cdot x_n = 272,3$ г.

Одержані дані заносимо в звітну таблицю 6. 2 в графу Початкова суміш.

Таблиця 7.1 – Розрахункові значення

Назва	Одиниці вимірювання	Початкова суміш	
		Позначення	Розрахунок
Об'єм	мл	V_n	1500
Концентрація	ваг. частки	x_n	0,1871
Густина	г/мл	ρ_n	0,87036
Маса суміші	г	W_n	1455
кількість легколеткого компонента	г	P_n	272

2. Для графічного розв'язку інтегралу $\int_{x_k}^{x_{kl}} \frac{dx}{y-x}$ виписуємо з довідкової таблиці додатку 1 необхідні дані про склад рідини та пари в межах від $x_k = 0,05$ до $x_{kl} = 18,71$, а потім обчислюємо значення $y-x$ і $\frac{1}{y-x}$

Одержані дані записуємо в звітну таблицю 6.3.

Для заповнення останніх двох граф таблиці вибираємо масштаби:

для $x - M_x = 0,002$; для $\frac{1}{y-x} - M_{\frac{1}{y-x}} = 0,02$.

Отримані значення другої та п'ятої граф ділимо на відповідні масштаби і одержуємо дані шостої та сьомої граф таблиці 6.3.

Наприклад

$$\frac{x_k}{M_x} = \frac{0.05}{0.002} = 25 \text{ мм};$$

$$\frac{1}{\frac{y-x}{M_{\frac{1}{y-x}}}} = \frac{3,13}{0,02} = 156,5$$

3. Для графічного розв'язку інтегралу даних граф 6 і 7 табл.6.3 будемо на міліметровому папері в прийнятому масштабі графік функцій $x = f\left(\frac{1}{y-x}\right)$.

Площа під кривою даної функції буде дорівнювати інтегралу $\int_{x_k}^{x_n} \frac{dx}{y-x}$, значення якої в прийнятому масштабі становитиме $D=8192 \text{ мм}^2$, або

$$A = \int_{x_k}^{x_n} \frac{dx}{y-x} = DM_x M_{\frac{1}{y-x}} = 8192 \cdot 0,002 \cdot 0,02 = 0,3277$$

4. Визначаємо масу кубового залишку W_k після перегонки, використовуючи рівняння (7.2):

$$A = \ln \frac{W_n}{W_k} \quad \text{або} \quad \frac{W_n}{W_k} = e^A$$

де $e = 2,718$ – основа натуральних логарифмів. Тоді

$$W_k = \frac{W_n}{e^A} = \frac{1455}{e^{0,3277}} = 1048$$

5. Визначаємо масу дистилляту

$$W_g = W_n - W_k = 1455 - 1048 = 407,0 \text{ г}$$

6. З рівняння (4.3) визначаємо концентрацію дистилляту

$$x_d = (1455 \cdot 0,1877 - 1046 \cdot 0,05) / 407 = 0,540$$

7. Визначаємо розрахункові дані для дистилляту:

а) по довідковій таблиці при концентрації 54 % мас. і температурі 20°C густина розчину $\rho_\delta = 0,9048 \text{ г/мл}$;

б) концентрація $x_\delta = 0,540$;

в) маса дистилляту $W_\delta = 407 \text{ г}$,

г) об'єм $V_d = W / \rho_\delta = 407 / 0,9048 = 450 \text{ мл}$;

д) кількість л.л.к. в дистилляті

$$P_d = W_d - x_u = 407 \cdot 0,540 = 220 \text{ г}$$

Результати розрахунку заносимо в звітну таблицю 7.4 в графу «Дистиллят по розрахунку».

8. Аналогічно розрахунку дистилляту визначаємо дані для кубового залишку:

а) при концентрації кубового залишку 5% мас. і температур 20°C ρ_k

=0,9893;

б) розрахункова концентрація $x_k = 0,05$;

в) кількість кубового залишку $W_k = 1048$ г;

г) об'єм $V_k = W_k / \rho_k = 1048/0,9893 = 1059$ мл

д) кількість лл.к. в кубовому залишку:

$$P_k = W_k \cdot x_k = 1048 \cdot 0,05 = 52,5$$

Результати розрахунку заносимо в таблицю 7.4 в графу "Кубовий залишок по розрахунку"

Таблиця 7.2 – Результати дослідів

ДИСТИЛЯТ			КУБОВИЙ ЗАЛИШОК		
Позначення	Розрахункові дані	Дані замірів	Позначення	Розрахункові дані	Дані замірів
V_d	450	450	V_k	1059	1050
x_d	0.540	0.5409	x_k	0.05	0.05
ρ_d	0,9048	0,90462	ρ_k	0,9893	0,9893
W_d	407	407	W_k	1048	1050
P_d	220	220	P_k	52,5	51,95

8. По закінченню розрахунків переганяємо 450 мл дистилляту. Температуру дистилляту треба підтримувати сталою (близько 20 °С). Цього досягають, регулюючи подачу холодної води в конденсатор.

Нехай у результаті перегонки одержано:

а) дистиллят: об'єм $V_d = 450$ мл; температура 23°C; показ спиртоміра 63,0 % (об);

б) кубовий залишок: об'єм $V_d = 1500 - 450 = 1050$ мл, температура після охолодження проби холодною водою - 24 °С; показ спиртоміра 7,0 % (об).

10. З таблиці 7.5, за якими робили попередні розрахунки, знаходимо: для дистилляту: показам спиртоміра 63,0 і температурі 23 °С відповідає концентрація 62,0 % (об) при 20°C, або 54,09 % (мас.) Густина дистилляту 0,90462 г/мл. Отже, маємо:

а) концентрація $x_d = 0,5409$;

б) густина $\rho_d = 0,90462$ г/мл;

в) об'єм $V_d = 450$ мл;

г) кількість дистилляту $W_{\partial} = 407$ г;

д) кількість л.л.к. в дистилляті

$$P_{\partial} = W_{\partial} x = 407 \cdot 0,540 = 220 \text{ г.}$$

Для кубового залишку: показу спиртоміра спиртоміра 7,0 і температурі 24°C відповідає концентрація 6,3% (об) при 20°C, або 5,0% (мас).

Отже, маємо:

а) концентрація $x_{\partial} = 0,050$;

б) густина $\rho_{\partial} = 0,9893$ г/мл;

в) об'єм $V_{\partial} = 1050$ мл;

г) кількість кубового залишку $W_k = 1050 \cdot 0,9893 = 1039$ г

д) кількість л.л.к. в кубовому залишку

$$P_k = W_k x_k = 1039 \cdot 0,050 = 51,95 \text{ г.}$$

Результати визначених даних занести в таблицю 7.4.

У випадку, коли розбіжності між розрахунковими та експериментальними даними будуть перевищувати 5%, необхідно виявити їх можливі причини.

Таблиця 7.3 – Результати дослідів

Вміст спирту		Різниця концентрацій	Величина	У масштабі, мм	
у рідині	у парі				
мас. %	x, частки	y-x	$\frac{1}{y-x}$	x	$\frac{1}{y-x}$

Таблиця 7.4 – Результати дослідів

Величини і одиниці вимірювання	Початкова суміш			Дистиллят			Кубовий залишок		
	Позначення	Розрахункові дані	Дані замірів	Позначення	Розрахункові дані	Дані замірів	Позначення	Розрахункові дані	Дані замірів
Об'єм, V мм	V_n			V_{∂}			V_k		
Концентрація x, % (мас)	x_n			x_{∂}			x_k		
Густина ρ , г/мл	ρ_n			ρ_{∂}			ρ_k		

Кількість W , г	W_n			W_2			W_L		
Кількість л.л.к. P , г	P_n			P_∂			P_k		

Таблиця 7.5 – Склад і температура киплячої водно-спиртової суміші та пари

Склад і температура киплячої водно-спиртової суміші та пари, що утворюється, при атмосферному тиску									
Склад	рідини	Темпе- ратура кипіння, °C	Склад пари		Склад рідини		Темпера- тура кипіння, °C	Склад пари	
			мас. % спирту	мол. % спирту	мас. % спирту	мол. % спирту		мас. % спирту	мол. % спирту
			a , %	X , %	a , %	X , %		a , %	X , %
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0,10	0,04	99,80	1,30	0,51	44,00	23,51	82,50	75,60	54,80
0,15	0,06	99,70	1,95	0,77	45,00	24,25	82,50	75,90	55,22
0,20	0,08	99,60	2,60	1,03	46,00	25,00	82,40	76,10	55,48
0,30	0,12	99,50	3,80	1,57	47,00	25,75	82,40	76,30	55,74
0,40	0,16	99,40	4,90	1,98	48,00	26,53	82,20	76,50	56,03
0,50	0,19	99,30	6,10	2,48	49,00	27,32	82,00	76,80	56,44
0,60	0,23	99,20	7,10	2,90	50,00	28,12	81,90	77,00	56,71
0,70	0,27	99,10	8,10	3,33	51,00	28,93	81,80	77,30	57,12
0,80	0,31	99,00	9,00	3,72	52,00	29,80	81,70	77,50	57,41
0,90	0,35	98,90	9,90	4,12	53,00	30,61	81,60	77,70	57,70
1,00	0,39	98,80	10,80	4,51	54,00	31,47	81,50	78,00	58,11
2,00	0,79	97,70	19,70	8,76	55,00	32,34	81,40	78,20	58,39
3,00	1,19	96,70	27,20	12,75	56,00	33,24	81,30	78,50	58,78
4,00	1,61	95,80	33,30	16,34	57,00	34,16	81,30	78,70	59,10
5,00	2,01	94,90	37,00	18,68	58,00	35,09	81,20	79,00	59,55
6,00	2,43	94,20	41,10	21,45	59,00	36,02	81,10	79,20	59,84
7,00	2,86	93,40	44,60	23,96	60,00	36,98	81,00	79,50	60,29
8,00	3,29	92,60	47,60	26,21	61,00	37,97	81,00	79,70	60,58
9,00	3,73	91,90	50,00	28,12	62,00	38,95	80,90	80,00	61,02
10,00	4,16	91,30	52,20	29,92	63,00	40,00	80,80	80,30	61,44
11,00	4,61	90,80	54,10	31,56	64,00	41,02	80,70	80,50	61,76
12,00	5,07	90,50	55,80	33,06	65,00	42,09	80,60	80,80	62,22
13,00	5,51	89,70	57,40	34,51	66,00	43,17	80,50	81,00	62,52
14,00	5,98	89,20	58,80	35,83	67,00	44,27	80,50	81,30	62,99

1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
15,00	6,46	89,00	60,00	36,98	68,00	45,41	80,40	81,60	63,43
16,00	6,86	88,30	61,10	38,06	69,00	46,55	80,30	81,90	63,91
17,00	7,41	87,90	62,20	39,16	70,00	47,72	80,20	82,10	64,21
18,00	7,95	87,70	63,20	40,18	71,00	48,92	80,10	82,40	64,70
19,00	8,41	87,40	64,30	41,27	72,00	50,16	80,00	82,80	65,35
20,00	8,92	87,00	65,00	42,09	73,00	51,39	80,00	83,10	65,81
21,00	9,42	86,70	65,80	42,94	74,00	52,68	79,90	83,40	66,28
22,00	9,93	86,40	66,60	43,82	75,00	54,00	79,80	83,80	66,93
23,00	10,48	86,20	67,30	44,61	76,00	55,34	79,70	84,10	67,42
24,00	11,00'	85,90	68,00	45,41	77,00	56,71	79,70	84,50	68,07
25,00	11,53	85,70	68,60	46,6*8	78,00	58,11	79,70	84,90	68,76
26,00	12,08	85,40	69,30	46,90	79,00	59,55	79,60	85,40	69,59
27,00	12,64	85,20	69,80	47,49	80,00	61,02	79,50	85,80	70,29

Контрольні питання

1. Які методи застосовують для розділення рідких однорідних сумішей?
2. Що таке проста перегонка і для яких сумішей її застосовують?
3. Суть законів Д.П.Коновалова.
4. Суть законів М.С. Вревського.
5. Які основні вимоги техніки безпеки при проведенні перегонки?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михайлов В. М., Шевченко А. О., Прасол С. В., Маяк О. А. Процеси і апарати харчових виробництв. Ч. 2. Теплообмінні процеси: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спец. 181 «Харчові технології». Харків: ДБТУ.2024. 153 с.
2. Процеси і апарати харчових виробництв: Підруч. / За ред.. І.Ф. Малезика. К.: НУХТ, 2021. 419 с.
3. Процеси і апарати. Механічні та гідромеханічні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, В.О. Верхоланцева, Н.О. Паляничка, С.В. Михайлов, О.О. Червоткіна. Мелітополь:, 2021. 445 с.
4. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, О.П. Ломейко. Мелітополь, 2020. 300 с.
5. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум: Навчальний посібник / Ю.Г. Сухенко, М.М. Жеплінська, В.П. Василів, М.М. Муштрук, З.А. Бурова. 1-е перевидання, перероблене і доповнене. – К.: НУБіП України, 2025. 242 с.
6. Черевко О.І., Поперечний А.М. Процеси і апарати харчових виробництв. Світ книг. 2019. 496 с.
7. Черевко О.І. Процеси і апарати харчових виробництв. Лабораторний практикум. Світ книг. 2020. 168 с.
8. Berk Z. Food Process Engineering and Technology. 3rd Edition. Academic Press, 2018. 744 p. ISBN: 978-0-12-812018-7.
9. Food Manufacturing Process: How Food Is Made. URL: <https://www.deskera.com/blog/food-manufacturing-process-how-food-is-made/> (дата звернення 15.12.2025)
10. Effective Separation Methods in Food Processing: Techniques and Applications. URL: <https://agriculture.institute/food-fundamentals-cpo/effective-separation-methods-food-processing/> (дата звернення 15.12.2025)
11. Food Processing Operations. URL: [https://nscpolteksby.ac.id/ebook/files/Ebook/Hospitality/Food%20Processing%20\(2011\)/3%20-%20Food%20Processing%20Operations.pdf](https://nscpolteksby.ac.id/ebook/files/Ebook/Hospitality/Food%20Processing%20(2011)/3%20-%20Food%20Processing%20Operations.pdf) (дата звернення 15.12.2025)
12. Heldman D.R., Lund D.B., Sabliov C.M. (Eds.) Handbook of Food Engineering. 3rd Edition. Press, 2019. 1231 p.
13. Neelesh K. Maurya, Anshu Thapa, Diana G. Nino, (2025), Thermal Processing in Food Preservation: A Comprehensive Review of Pasteurization, Sterilization, and Blanching, J. Nutrition and Food Processing, 8(5); DOI:10.31579/2637-8914/307

ЗМІСТ

ВСТУП	3
Лабораторна робота №1	
ВИПРОБУВАННЯ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ	4
Лабораторна робота №2	
СИТОВИЙ АНАЛІЗ СИПКОЇ СУМІШІ	7
Лабораторна робота №3	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ	9
Лабораторна робота №4	
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ МЕХАНІЧНОЇ МІШАЛКИ	13
Лабораторна робота №5	
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВІДСТОЮВАННЯ	18
Лабораторна робота №6	
ВИВЧЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ХАРЧОВИХ	25
ПРОДУКТІВ ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ	
Лабораторна робота №7	
ПРОСТА ПЕРЕГОНКА	29
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

Для нотаток

Процеси і апарати харчових виробництв [Текст]: методичні вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Харчові технології» G Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності G13 Харчові технології денної та заочної форм навчання / уклад. С. Г. Панасюк. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 44 с.

Комп'ютерний набір та верстка:

С.Г. Панасюк

Луцький національний технічний університет
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75