

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра механічної та електричної інженерії

ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ
(обов'язкова навчальна дисципліна)

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

для здобувачів вищої освіти за освітньо-професійною програмою Харчові технології спеціальності G13 Харчові технології галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво

Полтава, 2026

Скрипник В. О. Процеси і апарати харчових виробництв : лабораторний практикум з навчальної дисципліни для здобувачів вищої освіти за освітньо-професійною програмою Харчові технології спеціальності G13 Харчові технології галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво. Полтава, ПДАУ, 2026. 48 с.

Автор: Вячеслав Скрипник, професор кафедри механічної та електричної інженерії, д.т.н., професор

Рецензенти:

Миронов Д. А., доцент кафедри готельно-ресторанної та курортної справи Полтавського університету економіки і торгівлі, канд. техн. наук, доцент

Бичков Я. М., доцент кафедри механічної та електричної інженерії Полтавського державного аграрного університету, канд. техн. наук, доцент

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри механічної та електричної інженерії
Протокол від « 07 » квітня 2026 р., № 16

ВСТУП

Сучасні харчові виробництва характеризуються широким використанням складних технологічних процесів, що супроводжуються одночасним перебігом явищ перенесення маси, теплоти та імпульсу. Від умов протікання цих процесів залежать не лише техніко-економічні показники виробництва, але й якість, безпечність і споживчі властивості готової продукції. Тому розуміння фізичної сутності процесів і закономірностей їх перебігу є необхідною складовою підготовки фахівців у галузі харчових технологій.

Дисципліна «Процеси та апарати харчових виробництв» займає важливе місце у формуванні професійної підготовки здобувачів, оскільки забезпечує знання про механізми перебігу гідромеханічних, теплових та масообмінних процесів, а також принципи їх реалізації у відповідному технологічному обладнанні. У межах дисципліни розглядаються не лише окремі процеси, але й взаємозв'язки між ними, що дозволяє сформуванню цілісного уявлення про функціонування технологічних систем.

Особливого значення набуває здатність переходити від теоретичних положень до їх практичного застосування. Саме це забезпечується виконанням лабораторного практикуму, який є невід'ємною складовою навчального процесу. У ході виконання лабораторних робіт здобувачі вищої освіти ознайомлюються з реальними умовами перебігу процесів, набувають навичок роботи з технологічним обладнанням, засобами вимірювання та методами експериментальних досліджень.

Лабораторний практикум спрямований на формування вмінь отримувати експериментальні дані, виконувати їх обробку та інтерпретацію, а також робити обґрунтовані висновки щодо впливу окремих факторів на інтенсивність процесів. Важливим є також розвиток навичок аналізу отриманих результатів, виявлення причин відхилень та оцінки достовірності експериментальних даних.

Особливістю даного практикуму є його орієнтація на формування інженерного підходу до аналізу процесів харчових виробництв. Такий підхід базується на встановленні визначальних факторів процесу, оцінці їх взаємодії та використанні отриманих результатів для пояснення закономірностей перебігу технологічних операцій. У процесі виконання лабораторних робіт здобувачі вчаться не лише фіксувати результати вимірювань, а й розуміти їх фізичний зміст.

Лабораторні роботи побудовані у логічній послідовності відповідно до структури навчальної дисципліни. Першою роботою передбачено ознайомлення з основами інженерного аналізу процесів із використанням критеріїв подібності, що створює базу для подальшого вивчення дисципліни. Наступні роботи охоплюють дослідження гідромеханічних, теплових та масообмінних процесів, що найбільш часто зустрічаються у харчових виробництвах.

Запропонований лабораторний практикум забезпечує формування у здобувачів цілісного уявлення про перебіг технологічних процесів, створює

основу для розуміння принципів роботи обладнання та сприяє підготовці до вирішення практичних завдань у професійній діяльності.

1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

Лабораторний практикум спрямований на формування у здобувачів вищої освіти цілісного уявлення про перебіг процесів харчових виробництв та набуття навичок їх аналізу на основі експериментальних даних.

У процесі виконання лабораторних робіт здобувачі повинні навчитися працювати з технологічним обладнанням і засобами вимірювання, отримувати та обробляти експериментальні дані, встановлювати залежності між параметрами процесів і оцінювати вплив окремих факторів на їх інтенсивність.

Особлива увага приділяється формуванню здатності інтерпретувати результати досліджень з урахуванням фізичної сутності процесів, а також робити обґрунтовані висновки щодо їх перебігу та можливостей практичного використання отриманих результатів.

2. КОМПЕТЕНТНОСТІ

Інтегральна компетентність

Здатність розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми технічного і технологічного характеру, що характеризуються комплексністю та невизначеністю умов у виробничих умовах підприємств харчової промисловості та у процесі навчання, що передбачає застосування теоретичних основ та методів у сфері харчових технологій.

Загальні компетентності:

ЗК 1 – Знання і розуміння предметної області та професійної діяльності.

ЗК 4 – Здатність до пошуку та аналізу інформації з різних джерел.

ЗК 9 – Уміння розв'язувати поставлені задачі та приймати відповідні обґрунтовані рішення.

Спеціальні компетентності:

СК 1 – Здатність впроваджувати у виробництво технології харчових продуктів на основі розуміння сутності перетворень основних компонентів продовольчої сировини впродовж технологічного процесу.

СК 5 – Здатність розробляти нові та удосконалювати існуючі харчові технології з врахуванням принципів раціонального харчування, ресурсозаощадження та інтенсифікації технологічних процесів.

СК 7 – Здатність обирати та експлуатувати технологічне обладнання, складати апаратурно-технологічні схеми виробництва харчових продуктів.

3. ПРОГРАМНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ

ПРН1 – Знати і розуміти основні концепції, теоретичні та практичні проблеми в галузі харчових технологій.

ПРН2 – Виявляти творчу ініціативу та підвищувати свій професійний рівень шляхом продовження освіти та самоосвіти.

ПРН4 – Проводити пошук та обробку науково-технічної інформації з різних джерел та застосовувати її для вирішення конкретних технічних і технологічних завдань.

ПРН5 – Знати наукові основи технологічних процесів харчових виробництв та закономірності фізико-хімічних, біохімічних і мікробіологічних перетворень основних компонентів продовольчої сировини під час технологічного перероблення.

ПРН13 – Обирати сучасне обладнання для технічного оснащення нових або реконструйованих підприємств (цехів), знати принципи його роботи та правила експлуатації, складати апаратурно-технологічні схеми виробництва харчових продуктів запроектованого асортименту.

4. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Виконання лабораторного практикуму здійснюється відповідно до затвердженої програми дисципліни та графіка навчального процесу.

Перед початком виконання лабораторної роботи здобувачі вищої освіти повинні ознайомитися з її змістом, теоретичними відомостями та методикою проведення дослідження. Допуск до виконання лабораторної роботи здійснюється після перевірки рівня підготовки здобувачів за питаннями, наведеними у відповідному розділі.

У процесі виконання лабораторної роботи здобувачі повинні дотримуватися встановленої методики експерименту, правил техніки безпеки та інструкцій щодо роботи з обладнанням. Усі вимірювання виконуються з урахуванням вимог до точності та фіксуються у робочих записах.

Отримані експериментальні дані підлягають обробці із застосуванням відповідних розрахункових залежностей. Результати оформлюються у вигляді таблиць, графіків та розрахунків з подальшим аналізом.

Звіт з лабораторної роботи повинен містити: тему і мету роботи, короткі теоретичні відомості, вихідні дані, результати експерименту, розрахунки, аналіз отриманих результатів та висновки.

Захист лабораторної роботи здійснюється у формі співбесіди, під час якої здобувач повинен продемонструвати розуміння сутності досліджуваного процесу, обґрунтувати отримані результати та відповісти на контрольні питання.

До захисту допускаються роботи, виконані у повному обсязі та оформлені відповідно до встановлених вимог.

5. ШКАЛА ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ЇХ ЗАХИСТУ

4 бали (максимальний рівень)

Здобувач знає і розуміє основні концепції, теоретичні та практичні проблеми в галузі процесів і апаратів харчових виробництв за темою; вміє проводити пошук та обробку науково-технічної інформації з різних джерел та застосовувати її для вирішення конкретних технічних і технологічних завдань за темою; знає наукові основи процесів харчових виробництв та закономірності фізико-хімічних, біохімічних і мікробіологічних перетворень основних компонентів сировини під час технологічного перероблення в апаратах для реалізації цих процесів; знає принципові схеми сучасного обладнання і апаратів та принципи їх роботи, що свідчить про максимальний рівень сформованості компетентностей і повне досягнення програмних результатів навчання.

3 бали

Здобувач знає, але не повною мірою розуміє основні концепції, теоретичні та практичні проблеми в галузі процесів і апаратів харчових виробництв за темою; вміє проводити пошук та обробку інформації та застосовувати її для вирішення завдань; не в повному обсязі знає наукові основи процесів і закономірності перетворень сировини; знає принципові схеми обладнання, але не в повному обсязі розуміє принцип його роботи.

2 бали

Здобувач слабо знає і не точно розуміє основні концепції та проблеми за темою; не вміє повною мірою здійснювати пошук та обробку інформації; не в повному обсязі знає наукові основи процесів; слабо орієнтується у схемах обладнання та принципах його роботи.

1 бал

Здобувач має фрагментарні знання, слабо розуміє сутність процесів; не вміє застосовувати інформацію для вирішення задач; не орієнтується у закономірностях процесів і роботі обладнання, що відповідає мінімальному рівню сформованості компетентностей.

0 балів (мінімальний рівень)

Здобувач вищої освіти не з'явився на лабораторне заняття без поважної причини і не відпрацював його.

6. ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторний практикум охоплює основні процеси харчових виробництв і побудований за принципом послідовного переходу від загальних положень до дослідження окремих процесів та їх практичного застосування.

Лабораторна робота № 1. Застосування теорії подібності при моделюванні процесів та апаратів харчових виробництв (теоретично-розрахункова, ввідна).

Спрямована на формування базових уявлень про аналіз процесів із використанням критеріїв подібності.

Лабораторна робота № 2. Дослідження процесу осадження твердих тіл у рідкому середовищі

Передбачає визначення швидкості осадження та аналіз впливу властивостей середовища і частинок на перебіг процесу.

Лабораторна робота № 3. Вивчення процесу подрібнення в молотковій дробарці

Спрямована на дослідження процесу подрібнення та встановлення впливу режимних параметрів на його перебіг.

Лабораторна робота № 4. Дослідження роботи компресійної холодильної установки

Спрямована на вивчення принципу дії холодильних машин та визначення їх основних характеристик.

Лабораторна робота № 5. Дослідження процесу кондуктивного жарення м'яса в умовах стиснення

Спрямована на вивчення особливостей теплової обробки м'ясної сировини за одночасної дії нагрівання і механічного стискання.

Лабораторна робота № 6. Дослідження процесу кондуктивного сушіння м'яса в умовах стиснення

Передбачає дослідження кінетики видалення вологи та оцінку впливу стискання на перебіг процесу сушіння.

Лабораторна робота № 7. Дослідження процесу екстракції кави з різним ступенем подрібнення

Спрямована на аналіз впливу ступеня подрібнення сировини на інтенсивність екстрагування та вміст розчинних речовин у напої.

7. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторні роботи виконуються відповідно до методичних рекомендацій, наведених у даному практикумі, та спрямовані на закріплення теоретичних знань і формування практичних навичок дослідження процесів харчових виробництв.

Кожна лабораторна робота містить опис методики дослідження, порядок виконання, розрахункову частину та контрольні питання для допуску до роботи і її захисту.

Лабораторна робота № 1
(теоретично-розрахункова, ввідна)

Тема: ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСІВ ТА АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

Мета роботи:

- 1) ознайомитися з основними поняттями про методи дослідження процесів та апаратів та теоремами подібності та їх практичним використанням;
- 2) оволодіти методикою виведення критеріїв подібності з фізичного рівняння конкретного процесу;
- 3) оволодіти методикою обробки результатів досліджень у критеріальній формі;
- 4) опанувати метод аналізу розмірностей.

Література: [1], [2], [8].

Методичні рекомендації

Під час підготовки до лабораторної роботи:

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом. У разі відсутності конспекту лекцій скористатися теоретичним матеріалом, наведеним в дистанційному курсі за темою 1 «Основні положення та наукові основи курсу». Опанувати теоретичний матеріал за питаннями, винесеними на допуск до лабораторної роботи.

Питання на допуск до лабораторної роботи

- 1) З якою метою проводять дослідження процесів?
- 2) Назвіть методи дослідження процесів.
- 3) Які дані називають умовами однозначності?
- 4) У чому полягає суть аналітичного способу дослідження процесів? Його недоліки?
- 5) Коли застосовують до експериментальний спосіб дослідження процесів? Які його недоліки?

На лабораторній роботі в лабораторії:

2. Отримати допуск до роботи шляхом опитування викладачем.
3. Ознайомитися з теоретичними відомостями.

Теоретичні відомості

1. Загальні поняття про методи дослідження

Основна кількість технологічних процесів відрізняється значною складністю, деякі з них ще недостатньо вивчені. Цим пояснюється складність математичного опису процесів.

Під час вивчення технологічних процесів використовують теоретичний і експериментальний методи дослідження.

Теоретичний метод дослідження базується на використанні фізичного рівняння процесу, яке складається у диференціальній формі для елементарного об'єму речовини. Таке рівняння описує цілий клас явищ, основою яких є загальний закон фізики.

Між тим ці рівняння не відображають індивідуальних ознак окремого явища даного класу. Тому рішення даного рівняння багатозначне. Для знаходження конкретного рішення даного рівняння, що відрізняється серед інших даного класу однорідних явищ,

використовують додаткові дані або умови, які не містяться у вихідному рівнянні. Ці дані або умови називають *умовами однозначності*. До цих умов відносять:

- властивості про геометричні властивості системи;
- дані про фізичні властивості речовини;
- дані про стан системи на її межах і у початковий момент часу;
- умови взаємодії системи з оточуючим середовищем.

Однак незважаючи на те, що оговорюються деякі додаткові умови, рішення диференціальних рівнянь процесу можливе лише у ряді простих випадків. Введення допущень, що спрощують рівняння, у цілому призводить до значних похибок, що потребує багатократної перевірки отриманих результатів.

Отже, теоретичний метод у більшості випадків не може привести до остаточного рішення і при вивченні конкретних явищ необхідно звертатися до безпосереднього досліду.

Перевагами експериментального методу дослідження є достовірність отриманих результатів і можливість встановлення безпосереднього зв'язку між величинами, що характеризують процес. Однак результати дослідів мають обмежену цінність для практики, так як вони не можуть бути використані для другого явища, що відрізняється від дослідженого. Щоб охопити всі можливі випадки, необхідно провести велику кількість дослідів, які будуть відображати індивідуальні особливості різних процесів.

2. Теореми подібності

Вивчення процесів шляхом дослідів можливе тільки при наявності теорії постановки дослідів і обробки їх результатів. Такою теорією є *теорія подібності*.

Теорія подібності дозволяє використовувати позитивні сторони теоретичного та експериментального методів дослідження. Вона вказує, на які явища можна поширити результати окремих дослідів.

Відокремив з класу групу фізично подібних явищ, можна вивчити одне явище і результати дослідів поширити на всі явища даної групи. Таким чином, кількість необхідних дослідів значно зменшується і з'являється реальна можливість узагальнення і використання результатів цих дослідів. Три основні теореми подібності відповідають на три основних питання, що виникають при постановці дослідів:

1. Які величини треба виміряти під час проведення дослідів?
2. Як опрацювати одержані дані?
3. На які випадки практики можна поширити результати дослідів?

2.1. Перша теорема подібності

Вона відповідає на перше питання. У дослідях повинні бути визначатися не довільно вибрані величини, а тільки ті, які входять у безрозмірні узагальнені характеристики процесу, що називаються критеріями подібності.

Перша теорема подібності має два формулювання:

1) За М. В. Кирпічовим: «*У подібних явищ індикатори подібності дорівнюють одиниці*».

2) За І.Ньютоном: «*Подібні між собою явища мають чисельно однакові критерії подібності*».

Конкретна форма критеріїв подібності встановлюється з вихідних алгебраїчних або диференціальних фізичних рівнянь процесу та із умов однозначності.

2.1.1. Виведення критеріїв подібності із фізичного рівняння конкретного процесу

Розглянемо другий закон Ньютона:

$$F = m \cdot a = m \cdot w / \tau, \quad (2.1)$$

де: F – сила, що діє на тіло, Н; m – маса тіла, кг; a – прискорення, м/с²; w – швидкість руху, м/с; τ – час, с.

Уявимо, що ми маємо дві подібні системи, у яких дві частинки масами m_1 і m_2 рухаються подібно, тобто під дією сил F_1 і F_2 набувають прискорення w_1/τ_1 і w_2/τ_2
Отримаємо:

$$F_1 = m_1 \cdot w_1/\tau_1, \quad (2.2)$$

$$F_2 = m_2 \cdot w_2/\tau_2, \quad (2.3)$$

Поділимо рівняння (2.2) на рівняння (2.3)

$$F_1/F_2 = m_1 \cdot w_1 \cdot \tau_2/m_2 \cdot w_2 \cdot \tau_1, \quad (2.4)$$

Перенесемо всі величини рівняння (2.4), що відносяться до одного процесу, в різні сторони рівності:

$$\frac{F_1 \cdot \tau_1}{m_1 \cdot w_1} = \frac{F_2 \cdot \tau_2}{m_2 \cdot w_2}, \quad (2.5)$$

Таким чином, для двох подібних механічних процесів, що розглядаються, безрозмірний комплекс (2.5) зберігає одне і теж значення. Цей комплекс є критерієм подібності, називається критерієм Ньютона і позначається Ne

$$Ne = \frac{F \cdot \tau}{m \cdot w} = idem, \quad (2.6)$$

Якщо урахувати, що

$$\tau = \frac{\ell}{w},$$

то

$$Ne = \frac{F \cdot \ell}{m \cdot w^2}, \quad (2.7)$$

де ℓ - шлях, що проходить тіло, м.

Якщо у рівнянні (2.4) відношення подібних величин замінити їх константами подібності:

$$\frac{F_1}{F_2} = K_F; \quad \frac{m_1}{m_2} = K_m; \quad \frac{w_1}{w_2} = K_w; \quad \frac{\tau_1}{\tau_2} = K_\tau,$$

то отримаємо залежність між константами подібності:

$$K_F = \frac{K_m \cdot K_w}{K_\tau}; \quad (2.8)$$

з рівняння (2.8) маємо:

$$c = K_F \cdot K_\tau / K_m \cdot K_w = 1, \quad (2.9)$$

де c – індикатор подібності.

Таким чином, індикатор подібності двох подібних явищ дорівнює одиниці.

Використовуючи першу теорему подібності, можна визначити необхідні параметри моделі та натурального зразка при дотриманні їх подібності.

Наприклад, необхідно визначити діаметр труби для зразка, якщо діаметр труб у моделі 12 мм, а швидкість руху рідини 3 м/с. Швидкість руху рідини у зразку – 1,5 м/с.

Відомо, що гідродинамічний режим руху рідини характеризується критерієм Рейнольдса, який є мірою взаємовідношення сил інерції і сил тертя у потоці:

$$Re = \frac{wd}{\nu};$$

де w – швидкість руху потоку, м/с; d – геометричний розмір, м (у нашому прикладі це діаметр труб); ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с.

Відповідно до першої теореми подібності: $Re_1 = Re_2$.

Звідки: $w_1 d_1 / \nu = w_2 d_2 / \nu$.

В обох випадках одна і та ж рідина, тобто $\nu_1 = \nu_2 = \nu$, тому можна записати:

$$w_1 d_1 = w_2 d_2 .$$

Підставимо чисельні значення:

$$d_2 = \frac{w_1 \cdot d_1}{w_2} = \frac{0,012 \cdot 3}{1,5} = 0,024 \text{ м.}$$

3.2. Друга теорема подібності

Друга теорема подібності – Федермана-Букингема – відповідає на друге питання, тобто як необхідно обробляти результати дослідів, тобто в якій формі проводити їх обробку. Формулюється вона наступним чином: ***розв'язок диференційного рівняння можна подати у вигляді залежності між критеріями подібності, отриманими із цього рівняння.***

Таким чином, критерій подібності K_1 , що містить цікавісну величину і називається визначальним критерієм, має бути поданий як функція інших критеріїв, що відображають різні сторони процесу:

$$K_1 = f(K_2; K_3; K_4 \dots) \quad (2.8)$$

Звичайно це степенева функція:

$$K_1 = c K_2^m K_3^n K_4^p \dots, \quad (2.9)$$

де c, m, n, p – сталі, які визначаються при графічній обробці дослідів.

Залежність (2.9) називають критеріальним рівнянням.

Методика обробки результатів дослідів у критеріальній формі

Припустимо, що деякий процес описується у загальному вигляді критеріальним рівнянням:

$$K_1 = C \cdot K_2^n \quad (2.10)$$

При дослідженні цього процесу були проведені досліди на експериментальній установці, під час яких були виміряні усі величини, що входять у критерії K_1 та K_2 . Отриманий масив дослідних даних, за якими розраховані величини критеріїв K_1 і K_2 .

Задача дослідника полягає в тому, щоб залежність (2.10) привести до явного вигляду, тобто визначити чисельні значення величин C і n .

Визначення C і n проводять графоаналітичним методом. Степеневу залежність (2.10) шляхом логарифмування перетворюють із рівняння прямої лінії

$$\lg K_1 = \lg C + n \lg K_2 \quad (2.11)$$

Для побудови графіка за визначеними даними розраховують значення критеріїв K_1 і K_2 і їхніх логарифмів.

По отриманим даним будують графік $\lg K_1 = f(\lg K_2)$ (рис. 1.)

Показник ступеню n знаходять як тангенс кута нахилу прямої лінії:

$$n = \lg \alpha = \frac{bc}{ac} \quad (2.12)$$

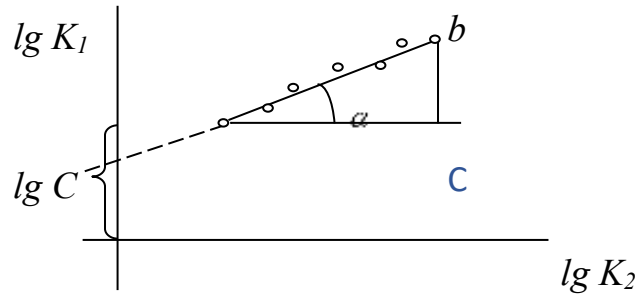


Рис. 1. До визначення C і n

Постійну C знаходять як відрізок, що відтинається прямою ab на осі ординат або з рівняння:

$$\lg C = \lg K_1 - n \lg K_2. \quad (2.13)$$

3.3 Третя теорема подібності

На третє питання, які явища подібні, відповідь дає третя теорема подібності М.В. Кирпичова і О.О. Гухмана, що формулюється наступним чином: «**Явища між собою подібні, якщо вони описуються однією тією ж системою диференціальних рівнянь і мають подібні умови однозначності**». Тобто подібні ті явища, що належать до одного класу, входять у ту саму групу явищ і відрізняються тільки масштабом. Отже, збіг значень критеріїв K для групи подібних процесів вказує на збіг числових значень визначальних критеріїв, тобто

$$K_1 = K_2' = K_2'' \quad (2.14)$$

або:

$$CK_2'K_3' = CK_2''K_3'' = CK_2'''K_3''' \quad (2.15)$$

Це рівняння відображає подібність умов однозначності. Якщо умови однозначності подібні, то фізична подібність існує у всій системі.

Метод аналізу розмірностей

Необхідне число критеріїв у критеріальній залежності виду (2.8.) встановлюється при аналізі вихідних рівнянь процесу й умов однозначності. Кількість критеріїв знаходять за допомогою допоміжної π – теореми, відповідно до якої кількість критеріїв π , отриманих із рівняння, визначається як різниця між числом фізичних величин n і числом основних m розмірностей:

$$\pi = n - m \quad (2.16)$$

Наприклад, у рідині зі щільністю ρ і динамічним коефіцієнтом в'язкості μ рухається лопать з характерним розміром d зі швидкістю w . Руху цієї лопаті перешкоджає опір середовища R . Залежність сили опору середовища R можна уявити в такій формі:

$$R = f(w, d, \mu, \rho) \quad (2.17)$$

Випишемо одиниці вимірів і розмірності параметрів цього процесу:

$$[R] = H = \frac{\text{кг}}{\text{с}^2}; \quad \dim R = ML\tau^{-2};$$

$$[w] = \frac{\text{м}}{\text{с}}; \quad \dim w = L\tau^{-1}; \quad [d] = \text{м}; \quad \dim d = L;$$

$$[\mu] = \frac{H \cdot c}{\text{м}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}; \quad \dim \mu = M \cdot L^{-1}\tau^{-1}; \quad [\rho] = \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad \dim \rho = M \cdot L^{-3}.$$

У даному випадку число фізичних величин складає $N = 5$; число розмірностей $n = 3$. Отже, число критеріїв $\pi = 2$.

Визначаємо конкретну форму критеріального рівняння процесу, що розглядається, застосовуючи метод аналізу розмірностей.

Уявимо цю залежність, як степеневу функцію (відповідно до другої теореми подібності).

$$R = C \cdot w^a d^b \mu^e \rho^d \quad (2.18)$$

Представимо залежність (2.18) через розмірності:

$$ML\tau^{-2} = CL^a \tau^{-a} L^b M^e L^{-e} \tau^{-e} M^d L^{-3d} \quad (2.19)$$

$$ML\tau^{-2} = CM^{e+d} \cdot L^{a+b-e-3d} \cdot \tau^{-a-e} \quad (2.20)$$

Прирівнюємо показники ступенів правої до показників лівої частини:

$$\begin{cases} 1 = e + d; \\ 1 = a + b - e - 3d; \\ -2 = -a - e. \end{cases} \quad (2.21)$$

Одержану систему рівнянь розв'язуємо, визначивши всі показники через величину e :

$$d = 1 - e; \quad a = 2 - e; \quad b = 1 - a + e + 3d = 1 - 2 + e + e + 3 - 3e = 2 - e.$$

Підставляємо значення ступеню в рівняння (2.18)

$$R = C w^{2-e} d^{2-e} \mu^e \rho^{1-e} \quad (2.22)$$

Дещо змінимо у рівнянні (2.22), тобто відокремимо числові показники ступенів від буквених:

$$R = C w^2 w^{-e} d^2 d^{-e} \mu^e \rho \rho^{-e} \quad (2.23)$$

Отримане рівняння (2.23) запишемо у вигляді:

$$R = Cw^2 d^2 \rho \left(\frac{\mu}{wd\rho} \right)^e \quad (2.24)$$

Безрозмірний комплекс, який включено у дужки, являє собою критерій Рейнольдса у від'ємному ступені:

$$R = cw^2 d^2 \rho Re^{-e} \quad (2.25)$$

$$\frac{R}{w^2 \rho d^2} = cRe^{-e} \quad (2.26)$$

З огляду на те, що сила тертя R , яка припадає на площу лопаті, являє собою перепад тиску ΔP , рівняння (2.26) можна записати

$$\frac{\Delta P}{\rho w^2} = cRe^{-e}. \quad (2.27)$$

Ліва частина рівняння (2.27) є безрозмірним комплексом і являє собою критерій Ейлера Eu .

Таким чином, процес, що описується функціональною залежністю (2.17), являє собою залежність між двома критеріями подібності:

$$Eu_M = c \cdot Re_M^{-e} \quad (2.28)$$

4. Для закріплення матеріалу розв'язати конкретні практичні задачі:

Задача 1. Вивести критерії подібності з: рівняння другого закону Ньютона - $F = m \cdot a = m \frac{w}{t}$, Н; рівняння рівномірного руху - $w = \frac{l}{t}$.

Задача 2. Довести, що критерії Re , Nu , Gr , Ar , Pr є безрозмірними симплексами, якщо:

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}; Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}; Gr = \frac{gl^3 \Delta T_{\beta}}{\nu^2}; Ar = \frac{gd^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2}; Pr = \frac{\nu}{a}.$$

Задача 3. Швидкість води в трубі теплообмінника діаметром 8 мм складає 2 м/с. Визначити швидкість руху води в подібному теплообміннику, якщо діаметр труби буде дорівнювати 18 мм.

Додаткові задачі (4–8) можуть виконуватися для підвищення рейтингу студента шляхом нарахування 2-х додаткових балів.

Задача 4. Визначити число Re для води при 40°C , що тече в трубі діаметром $d = 50$ мм, якщо витрата води складає $1 \text{ м}^3/\text{год}$.

Задача 5. Визначити значення критерію Ar для твердих часток діаметром $d = 0,3$ мм і щільністю 1300 кг/м^3 , що осаджувалися у воді при $t = 70^{\circ}\text{C}$.

Задача 6. Провести аналіз розмірностей для процесу, у якому швидкість руху є функцією прискорення u і висоти прошарку рідини H .

Задача 7. Одержати критеріальне рівняння процесу тепловіддачі горизонтальної труби в умовах природної конвекції. Об'єктом дослідження є горизонтальна латунна труба зовнішнім діаметром $d = 24$ мм довжиною $l = 1,25$ м, зовнішня поверхня якої покрита чорним лаком і має коефіцієнт опромінення $C_1 = 5 \text{ Вт/м}^2$. В середині труби вмонтовано електронагрівач з рівномірним

виділенням тепла. Споживана потужність електронагрівача вимірюється ватметром. Температура зовнішньої поверхні труби вимірюється мідь-константановими термометрами, які приєднані через перемикач до потенціометру. Спільний холодний спай розташований у посудині з льодом, який тоне. Температура оточуючого середовища вимірюється ртутним термометром.

Методичні рекомендації до вирішення задачі

Процес тепловіддачі в повітрі горизонтальної труби в умовах природної конвекції ($Pr=const$) описується критеріальним рівнянням:

$$Nu = CGr^n \quad (2.29)$$

де: $Nu = \alpha_k \cdot \ell / \lambda$ – критерій Ньютона; C, n – сталі, що визначаються при графічному зображенні результатів дослідів; Gr – критерій Грасгофа:

$$Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta T}{\nu^2};$$

де: l – визначальний розмір (у даному випадку діаметр труби), м; α_k – коефіцієнт конвективної тепловіддачі, Вт/(м² · град); λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м · град); g – прискорення вільного падіння, м/с²; β – коефіцієнт об'ємного розширення; $\Delta T = T_{cm} - T$ – температурний папір, °С; T_{cm} – середня температура тепловіддаючої поверхні труби, °С; T – температура навколишнього середовища, °С; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с.

Величину коефіцієнта тепловіддачі α_k визначаємо з рівняння

$$Q_k = \alpha_k \pi d L \Delta T;$$

де α_k – коефіцієнт конвективної тепловіддачі; d – діаметр досліджуваної труби, м; L – довжина труби, м; $\Delta T = T_{cm} - T$ – різниця температур між середньою температурою стінки труби і навколишнього середовища, °С;

Q_k – потік тепла, що віддає труба шляхом конвекції, Вт

$$Q_k = Q - Q_{випр},$$

де: Q – повний потік тепла, що віддає труба, Вт; $Q_{випр}$ – потік тепла, що віддає труба шляхом випромінювання, Вт.

Величина Q дорівнює кількості електроенергії, що споживається електронагрівачем, розташованим всередині досліджуваної труби

$$Q = I \cdot U, \text{ Вт};$$

де: I – величина струму живильної мережі, А; U – напруга в мережі, В.

В умовах, що розглядаються:

$$Q_l = C_1 \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right]; \quad (2.30)$$

Отже,

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{\pi d L \Delta T}; \quad \beta = \frac{1}{273 + T}, K^{-1}.$$

Для визначення критеріїв Грасгофа і Нуссельта величини ν і λ для повітря при відповідній темпера турі слід брати з таблиць (для довідки: для повітря при 20°C $\lambda = 0,026 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$; $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$).

При різних температурах труби отримано наступні значення коефіцієнтів тепловіддачі, температура навколишнього середовища складає 20°C .

T, K	$\alpha_k, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$

За отриманими даними будуюмо залежність $N_n = f(Gr)$ у логарифмічних координатах

$$CgNu = \lg C + n \lg Gr$$

Показник ступеню n чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу узагальненої прямої, яка проведена через дослідні точки, до вісі абсцис.

Стала C знаходиться як середня арифметична для трьох будь-яких точок на проведеній узагальненій прямій (на графіку ці точки відмітити колом)

$$C = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{3},$$

де:

$$C_1 = \frac{Nu_1}{Gr_1^n}; \quad C_2 = \frac{Nu_2}{Gr_2^n}; \quad C_3 = \frac{Nu_3}{Gr_3^n}.$$

Подальший порядок розв'язання задачі: записати конкретне критеріальне рівняння виду (2.29), яке описує процес; перевірити узагальнення по одній з дослідних точок (наприклад, по першій точці) і оцінити розбіжність у відсотках.

Задача 8. На лабораторній моделі теплообміну вивчається вплив швидкості повітря (примусова конвекція) на тепловіддачу до зовнішньої поверхні труби діаметром $d = 12,5$ мм. Середня температура повітря при атмосферному тиску $t_n = 20^\circ\text{C}$. При обробці дослідних даних коефіцієнт тепловіддачі відносять до середньої арифметичної різниці температур між

повітрям і стінкою. При різних швидкостях повітря отримано наступні значення коефіцієнта тепловіддачі

Швидкість повітря w , м/с	Коефіцієнт тепловіддачі α , $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$
2,0	50,1
3,1	68,5
4,8	90,0
9,0	139,0

Результати дослідів подати у критеріальній формі.

Методичні рекомендації для вирішення задачі

Для повітря число Прандтля при різних температурах практично не змінюється ($Pr=const$). Тому результати дослідів слід подавати у вигляді формули

$$Nu = C Re^n,$$

де: C , n – сталі, які визначаються при графічному зображенні результатів дослідів, $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ – критерій Нуссельта, λ – коефіцієнт теплопровідності повітря, $\frac{Вт}{м \cdot К}$

$Re = \frac{w \cdot d}{\nu}$ – критерій Рейнольдса. У довіднику при $20^\circ C$ $\lambda = 0,026 \frac{Вт}{м \cdot град}$; $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$.

Тоді $Nu = 0,48 \alpha$ $Re = 830 w$

Результати розрахунків доцільно звести у таблицю

w	Re	α	Nu
2,0	1660	50,1	24,1
3,1	2570	68,1	32,9
4,8	3980	90,0	43,2
9,0	7470	139,0	66,7

За отриманими даними слід побудувати залежність $Nu=f(Re)$ у логарифмічних координатах.

Подальший порядок розв'язання такий самий, як і в попередній задачі.

Показник степеня n чисельно дорівнює тангенсу кута нахилу узагальненої прямої, яка проведена через дослідні точки $n = \frac{52,0}{80} = 0,65$

Сталу C знаходимо як середню арифметичну для трьох будь-яких точок, що знаходяться на проведеної узагальненій прямій (на кресленні відмічені кружком)

$$C_1 = \frac{Nu_1}{Re_1^n} = \frac{28}{2000^{0,65}} = 0,200 \quad C_2 = \frac{Nu_2}{Re_2^n} = \frac{51}{5000^{0,65}} = 0,201$$

$$C_3 = \frac{Nu_3}{Re_3^n} = \frac{75}{9000^{0,65}} = 0,202 \quad C = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{3} = 0,201$$

Отже, шукане

рівняння $Nu = 0,201 Re^{0,65}$ Перевіримо узагальнення по одній із дослідних точок (наприклад, по першій точці: $Re = 1660$; $Nu = 24,1$: $Nu = 0,201 \cdot 1660^{0,65} = 0,201 \cdot 123,9 = 24,9$ Збіг задовільний (розбіжність з дослідом близько 3,3%).

5. Оформити звіт за лабораторною роботою.

Зміст звіту:

- 1) тема, мета роботи;
- 2) вирішені задачі 1-3;
- 3) висновок за роботою.

Питання для захисту лабораторної роботи

1. З якою метою проводять дослідження процесів?
2. Назвіть методи дослідження процесів.
3. У чому полягає суть аналітичного способу дослідження процесів? Його недоліки?
4. Коли застосовують до експериментальний спосіб дослідження процесів? Які його недоліки?
5. Назвіть приклади параметрів, які входять до складу диференціальних рівнянь, що описують процес.
6. У чому полягає суть методу узагальнених перемінних? З якою метою він був розроблений?
7. До яких методів вивчення явища відноситься моделювання? Коли його застосовують? Чим розрізняються фізичне і математичне моделювання?
8. Які задачі вирішує моделювання?
9. Що таке теорія подібності і на які теореми вона спирається?
10. Що називається критерієм подібності? Назвіть критерії гідромеханічної подібності.
11. Сформулюйте першу теорему подібності. На яке запитання при ставленні дослідів вона відповідає?
12. Сформулюйте другу теорему подібності. На яке запитання при ставленні дослідів вона відповідає?
13. Сформулюйте третю теорему подібності. На яке запитання при ставленні дослідів вона відповідає?
14. Як визначається кількість критеріїв у критеріальному рівнянні?
15. Який критерій подібності зветься визначальним?
16. У чому полягає методика обробки результатів досвіду у критеріальній формі?
17. В яких випадках застосовується метод аналізу розмірностей?
18. Назвіть основні критерії теплової подібності.

Лабораторна робота № 2

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСАДЖЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ У РІДКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Мета роботи:

- 1) визначити швидкість осадження твердих сферичних частинок у рідкому середовищі;
- 2) експериментально дослідити вплив густини та в'язкості рідини на швидкість їх руху;
- 3) розрахувати динамічну в'язкість рідини на основі закону Стокса.

Обладнання і матеріали:

мірний циліндр, лінійка з міліметровою шкалою, аналітичні ваги, секундомір, скляні кульки діаметром 1–3 мм, вода, кухонна сіль (NaCl), ємність для приготування розчинів, мішалка.

Література: [1], [2], [8].

Методичні рекомендації

Під час підготовки до лабораторної роботи:

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом. У разі відсутності конспекту лекцій скористатися теоретичним матеріалом, наведеним в дистанційному курсі за темою 4 «Поділ неоднорідних систем. Осадження. Центрифугування. Фільтрування». Опанувати теоретичний матеріал за питаннями, винесеними на допуск до лабораторної роботи.

Питання на допуск до лабораторної роботи

1. Що таке осадження (седиментація)?
2. Які сили діють на частинку під час осадження?
3. Що таке швидкість осадження?
4. Сформулювати закон Стокса.
5. За яких умов справедливий закон Стокса?
6. Що таке ламінарний режим руху частинки?
7. Як впливає розмір частинки на швидкість осадження?
8. Як впливає густина рідини на процес осадження?
9. Як впливає в'язкість середовища на процес осадження?
10. Що таке критичне число Рейнольдса для частинки?
11. Які режими осадження існують?
12. Що таке вільне та утруднене осадження?
13. Як визначається коефіцієнт опору руху частинки?
14. Які припущення приймаються при теоретичному описі процесу?
15. Де використовується процес осадження в харчових технологіях?

На лабораторній роботі в лабораторії:

2. Отримати допуск до роботи шляхом опитування викладачем.
3. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями.

Короткі теоретичні відомості

Осадження твердих частинок у рідкому середовищі є процесом їх переміщення під дією сили тяжіння. Рух частинки відбувається внаслідок різниці густин твердої фази та рідини.

На частинку діють три основні сили:

- сила тяжіння;
- виштовхувальна сила (Архімеда);
- сила опору середовища.

У стаціонарному режимі руху встановлюється рівновага сил, при якій швидкість осадження стає сталою (гранична швидкість).

Для дрібних сферичних частинок у ламінарному режимі використовується закон Стокса:

$$v = \frac{d^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{р}})g}{18\mu}$$

де: v – швидкість осадження, м/с; d – діаметр частинки, м; $\rho_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{р}}$ – густини частинки та рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с.

Закон Стокса справедливий за умов:

- сферична форма частинок;
- ламінарний режим ($Re < 1$);
- відсутність взаємодії між частинками.

Зі збільшенням розміру частинок або швидкості руху виникають відхилення від цього закону.

4. Провести експериментальні дослідження за наступною методикою

Методика проведення експерименту

4.1. Підготувати установку (циліндр з рідиною та твердими частинками) (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Мірний циліндр з лінійкою

Методика виконання експерименту

4.2. Налити в мірний циліндр чисту воду на висоту не менше 39 см.

4.3. Закріпити або прикласти до циліндра лінійку з міліметровою шкалою.

4.4. Відмітити на циліндрі дві точки:

- верхню – на відстані 10 см від поверхні рідини;

- нижню – на відстані 30 см від поверхні рідини.
- 4.5. Виміряти відстань між мітками h .
- 4.6. Зважити порожній мірний циліндр, визначити його масу m_1 .
- 4.7. Налити у циліндр 100 мл досліджуваної рідини.
- 4.8. Зважити циліндр з рідиною, визначити масу циліндра з рідиною m_2 .
- 4.9. Визначити масу рідини за формулою:

$$m = m_2 - m_1, \text{ кг.}$$

- 4.10. Зважити сухі скляні кульки, визначити їх масу $m_{\text{ч}}$.
- 4.11. Налити у циліндр воду та зафіксувати початковий об'єм V_1 .
- 4.12. Помістити кульки у воду.
- 4.13. Зафіксувати новий об'єм V_2 .
- 4.14. Визначити об'єм частинок за формулою:

$$V = V_2 - V_1, \text{ м}^3.$$

- 4.15. Обережно опустити одну кульку у верхню частину циліндра.
- 4.16. У момент проходження кулькою верхньої мітки увімкнути секундомір.
- 4.17. У момент проходження нижньої мітки зупинити секундомір.
- 4.18. Записати час осадження τ .
- 4.19. Повторити вимірювання не менше 3 разів.
- 4.20. Визначити середній час $\tau_{\text{сер}}$.
- 4.21. Замінити воду на розчин кухонної солі з концентрацією 10 %, потім 20 %.
- 4.22. Повторити дослідження за пунктами 5–19 для кожного розчину.
- 4.23. Результати вимірювань занести в таблицю 2.1.

Таблиця 1 – Результати експериментальних вимірювань

Середовище	h , м	τ_1 , с	τ_2 , с	τ_3 , с	$\tau_{\text{сер}}$, с
Вода					
Розчин $NaCl$ (10%)					
Розчин $NaCl$ (20%)					

- 5. Здійснити необхідні розрахунки за наведеною методикою.

Методика розрахунків

- 4.1. Густина рідини

$$\rho_p = \frac{m}{V}.$$

- 4.2. Густина частинок

$$\rho_{\text{ч}} = \frac{m_{\text{ч}}}{V}$$

4.3. Швидкість осадження

$$v = \frac{h}{t_{\text{сер}}}$$

4.4. Визначення динамічної в'язкості рідини

В'язкість рідини визначається за законом Стокса на основі експериментально виміряної швидкості осадження частинки.

$$\mu = \frac{d^2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{р}})g}{18v}$$

де: μ – динамічна в'язкість, Па·с; d – діаметр частинки, м; $\rho_{\text{ч}}$ – густина частинки, кг/м³; $\rho_{\text{р}}$ – густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння (9,81 м/с²); v – швидкість осадження, м/с.

4.5. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho_{\text{р}} v d}{\mu}$$

4.6. Результати розрахунків занести в таблицю 2.2

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків

Середовище	$\rho_{\text{р}}$, кг/м ³	$\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	v , м/с	μ , Па·с	Re
Вода					
Розчин NaCl (10%)					
Розчин NaCl (20%)					

5. Порівняти швидкість осадження частинок у воді та розчинах кухонної солі різної концентрації та зробити висновок про вплив властивостей середовища на процес осадження.

6. Оформити звіт по роботі.

Зміст звіту:

- 1) тема, мета роботи;
- 2) вихідні дані;
- 3) результати вимірювань (таблиця 2.1);
- 4) результати розрахунків (таблиця 2.2);
- 5) аналіз отриманих результатів;
- 6) висновки за роботою.

7. Захистити роботу перед викладачем за наступними питаннями.

Питання на захист лабораторної роботи

1. Пояснити механізм осадження частинок.
2. Які сили визначають швидкість осадження?
3. Чому встановлюється гранична швидкість?
4. В яких умовах застосовується закон Стокса?
5. Що відбувається при збільшенні числа Рейнольдса?
6. Чому експериментальні результати можуть відрізнятись від теоретичних?
7. Як впливає температура на процес осадження?
8. Як впливає форма частинок?
9. Що таке утруднене осадження?
10. Де використовується процес у харчовій промисловості?
11. Як зміниться швидкість при збільшенні в'язкості?
12. Як зміниться швидкість при зменшенні густини частинок?
13. Які похибки можливі під час експерименту?
14. Як підвищити точність вимірювань?
15. Які обмеження має застосована методика?

Лабораторна робота № 3

Тема: ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ В МОЛОТКОВІЙ ДРОБАРЦІ

Мета роботи:

- 1) дослідити процес подрібнення зернової сировини в молотковій дробарці;
- 2) визначити продуктивність дробарки;
- 3) оцінити якість подрібнення за допомогою гранулометричного аналізу;
- 4) встановити вплив виду сировини на ефективність подрібнення.

Обладнання і матеріали:

молоткова дробарка лабораторного типу, набір сит (4 шт.), піддон, лабораторні ваги, секундомір, ємності для збору продукту, зерно пшениці (1 кг), зерно гороху (1 кг).

Література: [1], [2], [8].

Методичні рекомендації

Під час підготовки до лабораторної роботи:

Ознайомитися з лекційним матеріалом за темою Тема 6. Механічні процеси. Опанувати теоретичний матеріал за питаннями, винесеними на допуск до лабораторної роботи.

Питання на допуск до лабораторної роботи

1. Що таке процес подрібнення?
2. Які способи подрібнення існують?
3. Який принцип роботи молоткової дробарки?
4. Які сили діють на частинки при подрібненні?
5. Що таке ступінь подрібнення?
6. Від чого залежить ефективність подрібнення?

7. Що таке гранулометричний склад?
8. Як визначається продуктивність дробарки?
9. Як впливає на процес подрібнення вологість матеріалу?
10. Які втрати можливі при подрібненні?
11. Що таке ситовий аналіз?
12. Які фактори впливають на розподіл частинок?
13. Чим відрізняється подрібнення різних культур?
14. Які переваги мають молоткові дробарки?
15. Які недоліки мають молоткові дробарки?

На лабораторній роботі в лабораторії:

4. Отримати допуск до роботи шляхом опитування викладачем.
5. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями.

Короткі теоретичні відомості

Подрібнення – це процес руйнування твердих матеріалів з метою зменшення розміру частинок.

У молотковій дробарці подрібнення здійснюється за рахунок:

- удару молотків;
- стирання;
- взаємного тертя частинок.

Якість подрібнення визначається гранулометричним складом продукту.

Гранулометричний склад визначають методом ситового аналізу, який полягає у розподілі частинок за розмірами за допомогою набору сит.

6. Провести експериментальні дослідження за наступною методикою

Методика проведення експерименту

- 3.1. Підготувати установку (рис. 3.1)



Рис. 3.1. Склад експериментального стенда

- 3.2. Зважити 1 кг пшениці.

- 3.3. Увімкнути дробарку.
- 3.4. Засипати зерно у дробарку.
- 3.5. Зафіксувати час подрібнення τ .
- 3.6. Зібрати подрібнений продукт.
- 3.7. Зважити отриману масу.
- 3.8. Визначити втрати маси.
- 3.9. Відібрати пробу подрібненого продукту (~100 г).
- 3.10. Зважити пробу (m_0).
- 3.11. Зібрати пакет сит у такому порядку: від найбільшого розміру отворів до найменшого + піддон.
- 3.12. Засипати матеріал у верхнє сито.
- 3.13. Просіювати протягом 2–3 хв.
- 3.14. Зважити масу залишку на кожному ситі.
- 3.15. Повторити дослід для гороху.
- 3.16. Результати занести в таблиці 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1 – Результати експериментальних вимірювань

Показник	Пшениця	Горох
Початкова маса, кг	1,0	1,0
Час подрібнення, с		
Маса подрібненого продукту, кг		
Втрати, %		

Таблиця 3.2 – Гранулометричний склад

№ сита	Розмір отворів, мм	Маса, г	Вміст, %
1			
2			
3			
4			
Піддон			
Σ	—	100	100

7. Здійснити необхідні розрахунки за наведеною методикою.

Методика розрахунків

7.1. Втрати маси

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100\%.$$

4.2. Продуктивність дробарки

$$Q = \frac{m}{\tau}.$$

4.3. Вміст фракцій

$$w_i = \frac{m_i}{m_0} \cdot 100\%.$$

8. Порівняти продуктивність дробарки для різних видів сировини; гранулометричний склад продукту; однорідність подрібнення. Пояснити отримані результати з урахуванням властивостей матеріалу.

9. Оформити звіт по роботі.

Зміст звіту:

- 1) тема, мета роботи;
- 2) вихідні дані;
- 3) результати вимірювань (таблиця 3.1);
- 4) гранулометричний склад (таблиця 3.2);
- 5) розрахунки;
- 6) аналіз результатів;
- 7) висновки.

7. Захистити роботу перед викладачем за наступними питаннями.

Питання на захист лабораторної роботи

1. Який механізм подрібнення в молотковій дробарці?
2. Які фактори впливають на процес?
3. Що таке ступінь подрібнення?
4. Як визначається продуктивність?
5. Чому різні матеріали подрібнюються по-різному та від чого це залежить?
6. Що показує гранулометричний склад?
7. Як впливає сито на склад подрібненого матеріалу?
8. Які похибки можливі?
9. Як підвищити ефективність процесу подрібнення?
10. Де використовується подрібнення у харчових технологіях?
11. Як впливає швидкість ротора на процес подрібнення?
12. Як впливає твердість матеріалу на процес подрібнення?
13. Що таке однорідність подрібнення?
14. Як можна удосконалити процес?

Лабораторна робота № 4

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОМПРЕСІЙНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Мета роботи:

- 1) ознайомитися з роботою компресійної холодильної установки;
- 2) експериментально визначити холодопродуктивність установки;
- 3) розрахувати холодильний коефіцієнт;
- 4) визначити теплове навантаження на конденсатор.

Обладнання і матеріали:

віконний кондиціонер БК-1500, ртутний термометр, секундомір, електрорічильник (або ватметр).

Література: [1], [2], [8].

Методичні рекомендації

Під час підготовки до лабораторної роботи:

Ознайомитися з лекційним матеріалом за темою 1 «Процеси охолодження, заморожування, розморожування». Опанувати теоретичний матеріал за питаннями, винесеними на допуск до лабораторної роботи.

Питання на допуск до лабораторної роботи

1. Який тип холодильної установки використовується у кондиціонері БК-1500?
2. Назвати основні елементи компресійної холодильної машини та показати їх на установці.
3. Яку функцію виконує випарник у даній установці?
4. Яку функцію виконує конденсатор?
5. Що відбувається з холодоагентом у компресорі?
6. Що таке холодопродуктивність і в яких одиницях вона вимірюється?
7. Як у даній роботі визначається холодопродуктивність установки?
8. Які параметри необхідно виміряти для визначення холодопродуктивності?
9. Що таке масова витрата повітря і як вона визначається в роботі?
10. Яке значення має різниця температур повітря на вході і виході?
11. Що таке холодильний коефіцієнт і як він розраховується?
12. Що означає співвідношення:

$$Q_k = Q_0 + N$$

13. Що фізично означає теплота, що відводиться у конденсаторі?
14. Чому теплота конденсатора більша за холодопродуктивність?

На лабораторній роботі в лабораторії:

10. Отримати допуск до роботи шляхом опитування викладачем.
11. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями.

Короткі теоретичні відомості

Компресійна холодильна установка працює за замкненим циклом, який включає:
– компресор;

- конденсатор;
- дросельний пристрій;
- випарник.

У випарнику холодоагент кипить, відбираючи тепло від повітря. У конденсаторі тепло віддається в навколишнє середовище.

Енергетичний баланс установки:

$$Q_k = Q_0 + N$$

де: Q_0 – холодопродуктивність, Вт; N – споживана потужність, Вт; Q_k – теплота, що відводиться в конденсаторі, Вт.

12. Провести експериментальні дослідження за наступною методикою

Методика проведення експерименту

12.1. Підготувати установку (рис. 4.1)

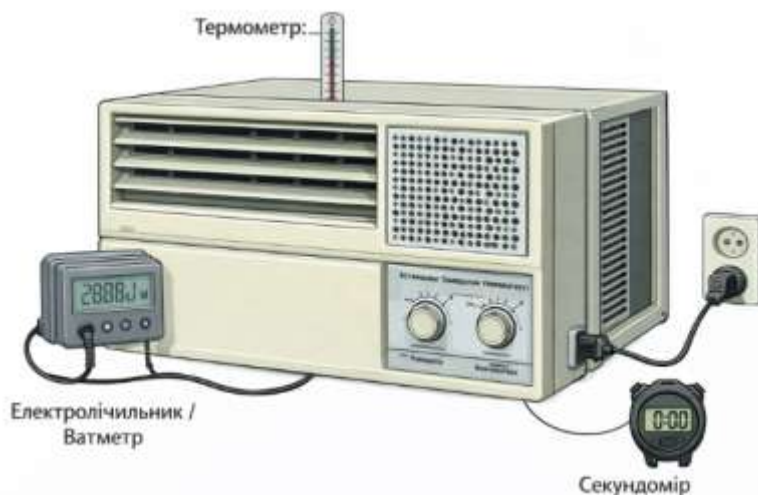


Рис. 4.1. Склад експериментального стенду

3.2. Увімкнути кондиціонер у режимі охолодження.

3.3. Дати установці попрацювати 5 хв для встановлення стаціонарного режиму.

3.4. Виміряти температуру повітря:

- на вході у випарник t_1
- на виході з кондиціонера t_2

3.5. Зафіксувати споживану потужність N .

3.6. Результати занести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати експериментальних вимірювань

Показник	Значення
Температура на вході, °С	
Температура на виході, °С	
Споживана потужність, Вт	

13. Здійснити необхідні розрахунки за наведеною методикою.

Методика розрахунків

4.1. Масова витрата повітря

$$\dot{m} = \rho \cdot \frac{L}{3600}$$

де:

$$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$$
$$L = 400 \text{ м}^3/\text{ГОД}$$

4.2. Холодопродуктивність

$$Q_0 = \dot{m} \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2)$$

де:

$$c_p = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

4.3. Холодильний коефіцієнт

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{N}$$

4.4. Теплове навантаження на конденсатор

$$Q_k = Q_0 + N$$

4.5. Результати розрахунків занести в таблицю 4.2

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків

Показник	Значення
Масова витрата, кг/с	
Холодопродуктивність, Вт	
Холодильний коефіцієнт	
Теплове навантаження, Вт	

14. Порівняти отриману холодопродуктивність із паспортною. Оцінити ефективність роботи установки. Пояснити можливі відхилення.

15. Оформити звіт по роботі.

Зміст звіту:

- 1) тема, мета роботи;
- 2) вихідні дані;
- 3) результати вимірювань;
- 4) розрахунки;
- 5) аналіз результатів;
- 6) висновки.

7. Захистити роботу перед викладачем за наступними питаннями.

Питання на захист лабораторної роботи

1. Пояснити принцип роботи компресійної холодильної установки на прикладі кондиціонера БК-1500. Описати послідовність процесів у циклі.

2. Охарактеризувати процеси, що відбуваються у випарнику. За рахунок чого відбувається охолодження повітря?

3. Охарактеризувати процеси у конденсаторі. Куди відводиться теплота і з яких складових вона складається?

4. Пояснити роль компресора в холодильному циклі. Як змінюються параметри холодоагенту при стисканні?

5. Пояснити призначення дросельного пристрою. Чому після нього температура холодоагенту знижується?

6. Пояснити, як у даній роботі визначається холодопродуктивність установки. Які припущення при цьому приймаються?

7. Вивести формулу для визначення холодопродуктивності через витрату повітря та зміну температури.

8. Пояснити фізичний зміст різниці температур повітря на вході і виході з установки.

9. Пояснити, що таке масова витрата повітря і як вона визначається в роботі.

10. Пояснити фізичний зміст холодильного коефіцієнта. Чому він може бути більшим за одиницю?

11. Пояснити енергетичний баланс установки:

$$Q_k = Q_0 + N$$

12. Пояснити, чому теплота, що відводиться у конденсаторі, більша за холодопродуктивність.

13. Пояснити, які складові входять у теплове навантаження конденсатора.

14. Порівняти експериментальну холодопродуктивність з паспортною. Чому вони можуть відрізнятися?

15. Проаналізувати можливі похибки експерименту (вимірювання температури, витрати повітря, потужності).

16. Пояснити вплив температури навколишнього середовища на ефективність роботи установки.

17. Пояснити, як зміна витрати повітря впливає на холодопродуктивність.

18. Пояснити, як потужність компресора впливає на роботу установки та холодильний коефіцієнт.

19. Пояснити вплив забруднення теплообмінників (випарника і конденсатора) на роботу установки.

20. Пояснити відмінність між ідеальним та реальним холодильним циклом.

21. Назвати основні джерела енергетичних втрат у реальній установці.

22. Запропонувати способи підвищення ефективності роботи холодильних установок.

23. Пояснити обмеження використаного в роботі методу визначення холодопродуктивності.

24. Навести приклади застосування компресійних холодильних установок у харчових технологіях.

25. Пояснити, як зміниться результат експерименту при збільшенні різниці температур повітря.

Лабораторна робота № 5

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНДУКТИВНОГО ЖАРЕННЯ М'ЯСА В УМОВАХ СТИСНЕННЯ

Мета роботи:

- 1) ознайомитися з процесом кондуктивного жарення м'ясної сировини;
- 2) експериментально визначити тривалість процесу та вихід готового продукту;
- 3) оцінити енергетичну ефективність процесу за різних режимів;
- 4) визначити тепловий ККД та відносні втрати ексергії;
- 5) порівняти традиційне жарення та жарення під тиском.

Обладнання і матеріали:

експериментальний стенд для кондуктивного жарення з двостороннім нагрівом; термопара; електролічильник (або енергомонітор); ваги лабораторні;

секундомір; зразки м'яса (свинина, $m \approx 0,1$ кг).

Література: [1], [2], [3], [4], [6], [8].

Методичні рекомендації

Під час підготовки до лабораторної роботи:

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом. У разі відсутності конспекту лекцій скористатися теоретичним матеріалом, наведеним в дистанційному курсі за темою 13 «Специфічні теплові процеси. Варіння. Смаження. Пастеризація. Стерилізація». Опанувати теоретичний матеріал за питаннями, винесеними на допуск до лабораторної роботи.

Питання на допуск до лабораторної роботи

1. Що таке кондуктивне жарення?
2. У чому відмінність кондуктивного та конвективного нагрівання?
3. Яку роль відіграє контакт між поверхнею і продуктом?
4. Як впливає тиск на процес теплопередачі?
5. Що таке коефіцієнт теплового контакту?
6. Чому при стисканні зменшується контактний термічний опір?
7. Які процеси відбуваються в продукті під час жарення?
8. Яка температура в центрі продукту вважається кулінарною готовністю?
9. Які параметри вимірюються в експерименті?
10. Як визначається тривалість процесу?
11. Що таке вихід готового продукту?

12. Як визначається витрата електроенергії?
13. Що входить до складу корисно використаного тепла?
14. Що таке тепловий ККД процесу?
15. Що таке ексергія та її втрати?

На лабораторній роботі в лабораторії:

1. Отримати допуск до роботи.
2. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями.

Короткі теоретичні відомості

Кондуктивне жарення є способом теплової обробки харчових продуктів, при якому теплота передається від нагрівальної поверхні безпосередньо до продукту шляхом теплопровідності. На відміну від конвективного або радіаційного нагрівання, інтенсивність процесу визначається умовами контакту між продуктом і нагрівальною поверхнею.

Основним механізмом перенесення теплоти у системі «нагрівальна поверхня – продукт» є теплопровідність, яка описується законом Фур'є:

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу.

Однак у процесі кондуктивного жарення визначальним є не лише перенесення теплоти всередині продукту, а й теплообмін на межі контакту. Тепловий потік на межі «поверхня – продукт» визначається співвідношенням:

$$q = h_c(T_s - T_m)$$

де h_c – коефіцієнт теплового контакту, T_s – температура нагрівальної поверхні, T_m – температура продукту.

Величина коефіцієнта теплового контакту значною мірою залежить від реальної площі контакту, яка, у свою чергу, визначається шорсткістю поверхонь, структурою продукту та прикладеним тиском. У реальних умовах контакт між продуктом і нагрівальною поверхнею є неповним: між ними існують мікронерівності та повітряні прошарки, які мають низьку теплопровідність і створюють додатковий термічний опір.

При прикладанні надлишкового тиску відбувається деформація продукту, що призводить до:

- збільшення фактичної площі контакту;
- витіснення газової фази з порового простору;
- зменшення товщини повітряних прошарків;
- зниження контактного термічного опору.

У результаті цього коефіцієнт теплового контакту істотно зростає, що забезпечує інтенсифікацію процесу теплопередачі навіть за нижчих температур нагрівальних поверхонь.

Таким чином, у процесі кондуктивного жарення під тиском реалізується компенсаційний механізм: зниження температурного рівня нагрівальних поверхонь компенсується збільшенням інтенсивності теплопередачі за рахунок підвищення коефіцієнта теплового контакту.

Внутрішні процеси у продукті під час жарення включають:

- нагрівання;
- денатурацію білків;
- коагуляцію;
- виділення та переміщення вологи;

- часткове випаровування вологи.

Температурне поле всередині продукту є нестационарним і характеризується наявністю температурного градієнта між поверхнею і центром. Готовність продукту визначається досягненням температури в центрі на рівні близько 72 °С, що забезпечує необхідні кулінарні та санітарні показники.

Особливістю процесу жарення під тиском є також зміна умов масоперенесення. Під дією стискання відбувається часткове витіснення вологи з капілярно-пористої структури продукту. Це зменшує втрати маси при подальшому нагріванні та сприяє збереженню соковитості.

Енергетичний аналіз процесу базується на положеннях першого закону термодинаміки. Загальна кількість підведеної енергії витрачається на нагрівання продукту, випаровування частини вологи та покриття теплових втрат:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{кор}} + Q_{\text{вт}}$$

Корисно використане тепло включає теплоту, витрачену на нагрівання продукту та випаровування вологи:

$$Q_{\text{кор}} = G \cdot c \cdot \Delta T + (1 - z) \cdot r \cdot \varepsilon$$

де перша складова характеризує підвищення температури продукту, а друга – витрати теплоти на фазовий перехід вологи.

Оцінювання ефективності процесу здійснюється за допомогою теплового ККД:

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{заг}}}$$

Однак повна оцінка ефективності потребує врахування як кількісних, так і якісних характеристик енергії, що досягається шляхом використання ексергетичного аналізу. Відносні втрати ексергії характеризують ступінь необоротності процесу та визначаються як різниця між підведеною і корисно використаною ексергією.

Зменшення температурного рівня процесу при одночасному підвищенні інтенсивності теплопередачі дозволяє знизити ексергетичні втрати та підвищити загальну ефективність процесу.

Таким чином, застосування надлишкового тиску при кондуктивному жаренні забезпечує:

- скорочення тривалості процесу;
- зменшення енерговитрат;
- підвищення теплового ККД;
- покращення органолептичних показників готового продукту.

16. Провести експериментальні дослідження за наступною методикою

Методика проведення експерименту

3.1. Підготувати установку (рис. 5.1).

3.2. Провести традиційне жарення

- увімкнути нижню плиту;
- встановити температуру 180 °С;
- після досягнення температури завантажити зразок;
- жарити до температури 72 °С у центрі (контроль термопарою);
- провести три повторності;

- після завершення визначити масу продукту, витрату електроенергії та провести органолептичну оцінку.

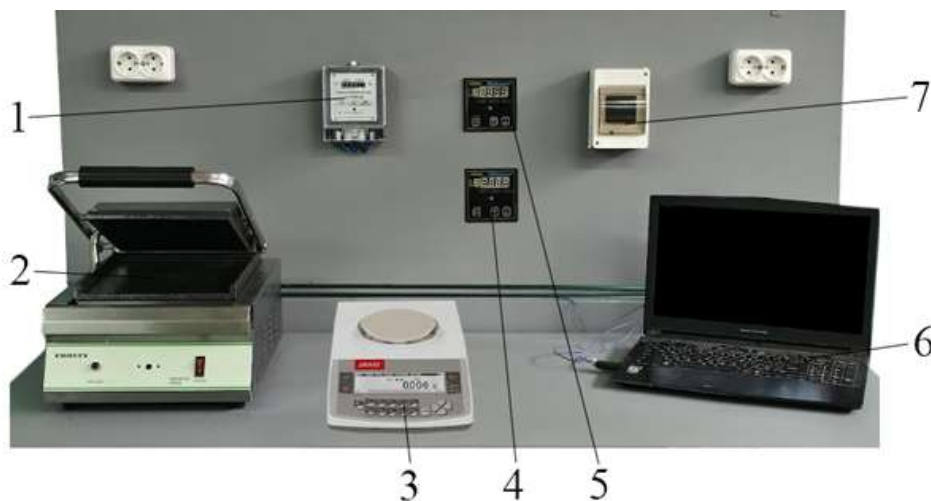


Рис. 5.1. Схема експериментального стенду:

1 – однофазний лічильник електроенергії «Сиргум S121H»; 2 – модернізований контактний гриль «Frosty SP-1A3»; 3 – лабораторні ваги «Axis AD-600»; 4 – ТРЦ «02 Універсал плюс»; 5 – ТРЦ «02 Універсал плюс»; 6 – комп'ютер для реєстрації даних; 7 – монітор-лічильник «Smart-maic D101»

3.3. Провести жарення під тиском

- встановити температуру верхньої і нижньої плит 150 °С;
- після досягнення температури завантажити зразок;
- створити надлишковий тиск 13,5 кПа;
- жарити до температури 72 °С у центрі;
- провести три повторності;
- після завершення визначити масу продукту, витрату електроенергії та провести органолептичну оцінку.

3.4. Визначити:

- масу зразка до жарення;
- масу готового продукту;
- тривалість процесу;
- витрату електроенергії;
- органолептичні показники.

3.5. Органолептичну оцінку проводити за 5-тибальною шкалою за показниками:

- зовнішній вигляд;
- колір поверхні;
- консистенція;
- соковитість;
- смак;
- аромат.

3.6. Результати занести в таблиці 5.1–5.2.

Таблиця 5.1 – Результати експериментальних вимірювань

Показник	Традиційне жарення	Жарення під тиском
Маса до, кг		
Маса після, кг		
Тривалість, с		
Витрата електроенергії, кВт·год		

Таблиця 5.2 – Органолептична оцінка

Показник	Традиційне жарення	Жарення під тиском
Зовнішній вигляд		
Колір поверхні		
Консистенція		
Соковитість		
Смак		
Аромат		
Середня оцінка		

17. Здійснити необхідні розрахунки за наведеною методикою.

Методика розрахунків

4.1. Вихід готового продукту

$$z = \frac{m}{m_0} \cdot 100;$$

де: m – маса готового продукту після жарення, кг; m_0 – початкова маса зразка, кг; z – вихід продукту, %.

4.2. Корисно використане тепло

$$Q_{\text{кор}} = m_0 \cdot c \cdot \Delta T + (1 - z) \cdot r \cdot \varepsilon$$

де: c – середня питома теплоємність м'яса, Дж/(кг·К) ($\approx 3400 \dots 3500$ Дж/(кг·К)); ΔT – зміна температури продукту, К; r – питома теплота пароутворення води, Дж/кг ($\approx 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг); ε – коефіцієнт, що враховує частку вологи, яка випаровується (у роботі приймається $\varepsilon = 1$); $Q_{\text{кор}}$ – корисно використане тепло, Дж.

4.3. Загальна підведена теплота

$$Q_{\text{заг}} = E \cdot 3,6 \cdot 10^6;$$

де: E – витрата електроенергії, кВт·год; $Q_{\text{заг}}$ – підведена теплота, Дж.

4.4. Питома витрата електроенергії

$$e = \frac{E}{m}$$

де: E – витрата електроенергії, кВт·год.; e – питома витрата електроенергії, кВт·год/кг.

4.5. Тепловий ККД процесу

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{заг}}}$$

4.6. Ексергетичний ККД

Ексергія теплоти визначається як її максимально можлива корисна робота:

$$Ex = Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right);$$

де: Q – кількість теплоти, Дж; T – температура джерела теплоти, К; T_0 – температура навколишнього середовища, К.

Ексергетичний ККД визначається як:

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{\text{кор}}}{Ex_{\text{заг}}}$$

де: $Ex_{\text{кор}}$ – корисно використана ексергія, Дж; $Ex_{\text{заг}}$ – підведена ексергія, Дж.

4.7. Відносні втрати ексергії

$$\psi = 1 - \eta_{ex}$$

4.8. Результати розрахунків занести в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3 – Результати розрахунків

Показник	Традиційне	Під тиском
Вихід, %		
Q _{кор} , Дж		
Питома витрата електроенергії, кВт·год/кг		
Тепловий ККД		
Відносні втрати ексергії		

18. Порівняти для двох способів жарення тривалість процесу, вихід готового продукту, витрату електроенергії, тепловий ККД, відносні втрати ексергії та органолептичні показники. Пояснити вплив стискання на інтенсивність теплопередачі, втрати маси та якість готового продукту.

6. Оформити звіт по роботі.

Зміст звіту:

1) тема, мета роботи;

- 2) вихідні дані;
 - 3) результати вимірювань (таблиці 5.1-5.2);
 - 4) розрахунки (таблиця 5.3);
 - 5) аналіз результатів;
 - 6) висновки.
7. Захистити роботу перед викладачем за наступними питаннями.

Питання на захист лабораторної роботи

1. Пояснити принцип кондуктивного жарення м'яса.
2. У чому відмінність однобічного та двобічного нагрівання?
3. Як змінюється механізм теплопередачі при стисканні?
4. Пояснити роль коефіцієнта теплового контакту.
5. Як тиск впливає на тепловий потік?
6. Чому при нижчій температурі можливе інтенсифікування процесу?
7. Пояснити зміну структури м'яса під дією стискання.
8. Чому змінюється тривалість процесу?
9. Як визначається готовність продукту?
10. Пояснити зміну вологості під час жарення.
11. Чому змінюється вихід готового продукту?
12. Пояснити складові корисно використаного тепла.
13. Як визначається тепловий ККД процесу?
14. Пояснити фізичний зміст ексергії.
15. Що таке втрати ексергії?
16. Які основні джерела енергетичних втрат?
17. Як визначається питома витрата енергії?
18. Пояснити відмінності органолептичних показників.
19. Як тиск впливає на соковитість продукту?
20. Чому змінюється колір поверхні?
21. Як впливає температура поверхонь на процес?
22. Які похибки можливі в експерименті?
23. Як підвищити ефективність процесу?
24. Де застосовується кондуктивне жарення в харчових технологіях?
25. Які обмеження має даний метод?

Лабораторна робота № 6

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНДУКТИВНОГО СУШІННЯ М'ЯСА В УМОВАХ СТИСНЕННЯ

Мета роботи:

- 1) ознайомитися з процесом кондуктивного сушіння м'ясної сировини;
- 2) дослідити вплив надлишкового тиску на кінетику сушіння;
- 3) дослідити вплив миттєвого скидання тиску на інтенсивність зневоднення;
- 4) порівняти експериментальні результати з модельними;

5) оцінити адекватність трисекційної кінетичної моделі процесу сушіння з імпульсним скидання тиску.

Обладнання і матеріали:

експериментальний апарат для кондуктивного сушіння з двостороннім нагрівом; пневматична система створення тиску; компресор з ресивером; манометр; терморегулятор; ваги лабораторні; секундомір; електролічильник (енергомонітор); зразки м'яса (свинина, товщина 0,003 м).

Література: [1], [2], [5], [7], [8].

Методичні рекомендації

Під час підготовки до лабораторної роботи:

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом. У разі відсутності конспекту лекцій скористатися теоретичним матеріалом, наведеним в дистанційному курсі за темою 16 «Теоретичні основи процесу сушіння. Спеціальні та перспективні методи сушіння». Опанувати теоретичний матеріал за питаннями, винесеними на допуск до лабораторної роботи.

Питання на допуск до лабораторної роботи

1. Що таке кондуктивне сушіння?
2. Які механізми перенесення вологи існують у матеріалі?
3. Яку роль відіграє тиск у процесі сушіння?
4. Як змінюється структура продукту при стисканні?
5. Що таке контактний теплообмін?
6. Чому при стисканні інтенсифікується процес?
7. Що таке рівноважна вологість?
8. Які параметри визначаються в експерименті?
9. Що таке кінетика сушіння?
10. Які існують періоди сушіння?
11. У чому суть імпульсного видалення вологи?
12. Що таке трисекційна кінетика?
13. Який фізичний зміст стрибка вологості?
14. Що таке адекватність математичної моделі?

На лабораторній роботі в лабораторії:

1. Отримати допуск до роботи.
2. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями.

Короткі теоретичні відомості

Кондуктивне сушіння є процесом видалення вологи з матеріалу шляхом підведення теплоти через безпосередній контакт із нагрівальними поверхнями. Інтенсивність процесу визначається як теплоперенесенням у матеріалі, так і умовами контакту між поверхнею та продуктом.

У системі «нагрівальна поверхня – матеріал» тепловий потік описується законом теплопровідності, однак визначальним є теплообмін на межі контакту, який характеризується коефіцієнтом теплового контакту. Його величина залежить від реальної площі контакту, що, у свою чергу, визначається тиском, структурою матеріалу та шорсткістю поверхонь.

При прикладанні надлишкового тиску відбувається ущільнення структури продукту, витіснення повітря з порового простору та збільшення фактичної площі контакту. Це призводить до зменшення контактного термічного опору і підвищення інтенсивності підведення теплоти.

Одночасно зі зміною умов теплоперенесення відбуваються суттєві зміни в механізмі масоперенесення. Під дією стискання зменшується об'єм порового простору, а волога частково витісняється до поверхні матеріалу.

Особливістю процесу є можливість реалізації імпульсного режиму сушіння. При різкому скиданні тиску відбувається миттєве порушення термодинамічної рівноваги, що призводить до різкого вивільнення вологи з капілярно-пористої структури матеріалу. Це супроводжується стрибкоподібним зменшенням вологості продукту.

Таким чином, кінетика сушіння в умовах стискання має складний характер і може бути представлена у вигляді трьох послідовних стадій:

- період сушіння під тиском;
- імпульсний етап (миттєве видалення вологи);
- період дифузійного досушування.

3. Провести експериментальні дослідження за наступною методикою

Методика проведення експерименту

3.1. Підготувати установку (рис. 6.1).

–

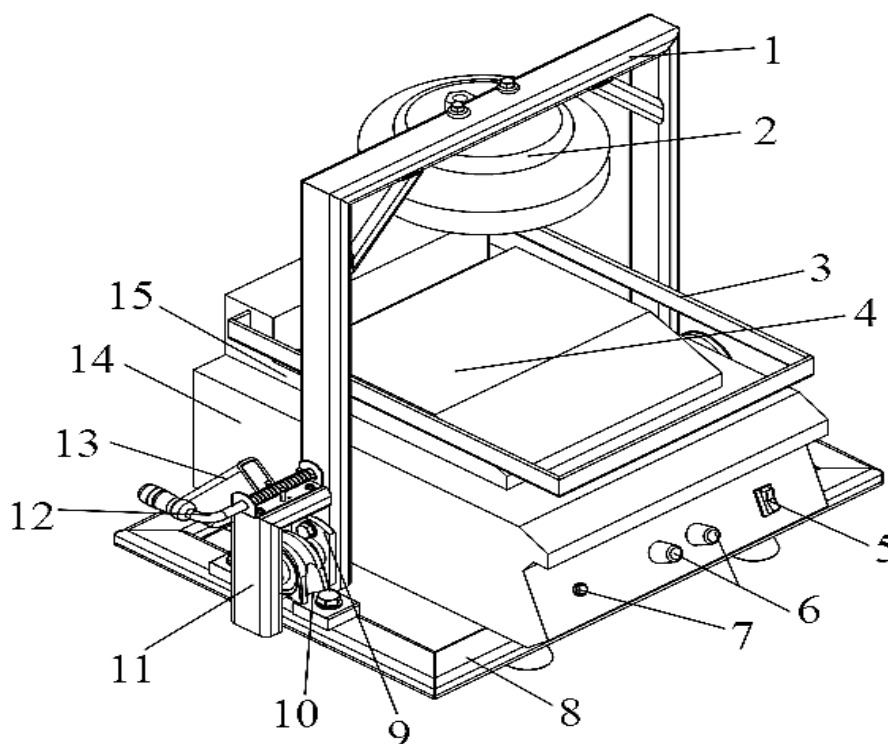


Рис. 6.1. Конструктивна модель апарата для кондуктивного сушіння м'яса:

1 – П-подібна рамка; 2 – пневматична подушка; 3 – рукоятка; 4 – верхня нагрівальна поверхня; 5 – кнопка увімкнення та вимкнення живлення; 6 – двоканальний терморегулятор; 7 – індикатор підвищення температури; 8 – платформа; 9 – піввісь; 10 – підшипниковий вузол; 11 – кронштейн; 12 – стопор; 13 – упор; 14 – корпус апарата; 15 – нижня нагрівальна поверхня

3.2. Сушіння під постійним тиском:

- встановити температуру нагрівальних поверхонь 130 °С;

- розмістити зразок товщиною 0,003 м;
 - створити тиск 0,105 МПа;
 - здійснювати сушіння до рівноважної вологості;
- визначити:

- початкову масу;
 - кінцеву масу;
 - тривалість процесу;
- витрату електроенергії.

3.3. Сушіння зі скиданням тиску

- встановити температуру 130 °С;
 - створити тиск 0,105 МПа;
 - здійснювати сушіння до зникнення звукових коливань;
 - різко скинути тиск;
 - продовжити сушіння до рівноважної вологості;
- визначити:

- початкову масу;
- кінцеву масу;
- тривалість процесу;
- витрату електроенергії.

3.4. Результати занести в таблицю 6.1

Таблиця 6.1 – Результати експериментальних вимірювань

Показник	Без скидання	Зі скиданням
Маса початкова, кг		
Маса кінцева, кг		
Тривалість, с		
Витрата електроенергії, кВт·год		

4. Здійснити необхідні розрахунки за наведеною методикою.

Методика розрахунків

4.1. Вологість продукту

$$W = \frac{m - m_c}{m_c}$$

де: m – маса продукту, кг; m_c – маса сухої речовини, кг; W – вологість, кг/кг.

4.2. Середня швидкість сушіння

$$v = \frac{W_0 - W_e}{\tau}$$

4.3. Трисекційна кінетична модель (з миттєвим скидом тиску)

$$W(\tau) = \begin{cases} W_0 \cdot ((0.989 - 1.429 \cdot 10^{-6}p) + \delta_m)^\tau, & 0 \leq \tau \leq \tau_1 \\ W(\tau_1^+) = W(\tau_1^-) - \Delta W_i, & \tau = \tau_1 \\ W_e + (W(\tau_1^+) - W_e)\exp[-k_d(\tau - \tau_1)], & \tau > \tau_1 \end{cases}$$

де: W_0 – початкова вологість; W_e – рівноважна вологість; p – тиск, Па; τ_1 – момент скидання тиску; ΔW_i – імпульсне зменшення вологості; k_d – коефіцієнт дифузійного сушіння.

Момент скидання тиску відповідає миттєвому стрибку вологості і не має тривалості у часі.

4.4. Модельні значення тривалості процесу

Для умов експерименту:

– сушіння під постійним тиском:

$$\tau_{mod} = 230 \text{ с}$$

– сушіння зі скиданням тиску: $\tau_{mod} = 190 \text{ с}$

4.5. Порівняння з модельними даними

За критерієм адекватності ε порівняти експериментальні і модельні дані тривалості сушіння

$$\varepsilon = \frac{|\tau_{exp} - \tau_{mod}|}{\tau_{exp}} \cdot 100$$

Якщо значення критерію адекватності $\varepsilon \leq 5\%$, то експеримент проведений вірно. Якщо значення критерію адекватності $\varepsilon \geq 5\%$, то експеримент містить похибку.

4.5. Питома витрата енергії

$$e = \frac{E}{m}$$

4.6. Результати розрахунків звести в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати розрахунків

Показник	Без скидання	Зі скиданням
Тривалість (експ.), с		
Тривалість (модель), с		
Похибка, %		
Питома витрата, кВт·год/кг		

5. Порівняти тривалість сушіння; оцінити вплив скидання тиску; проаналізувати розбіжність з моделлю; зробити висновок про адекватність моделі; пояснити фізичну природу імпульсного видалення вологи.

6. Оформити звіт по роботі.

Зміст звіту:

- 1) тема, мета роботи;
- 2) вихідні дані;
- 3) результати вимірювань (таблиця 6.1);
- 4) розрахунки і їх результати (таблиця 6.2);
- 5) аналіз результатів;
- 6) висновки.
7. Захистити роботу перед викладачем за наступними питаннями.

Питання на захист лабораторної роботи

1. Пояснити принцип кондуктивного сушіння.
2. Які механізми видалення вологи існують?
3. Як тиск впливає на структуру матеріалу?
4. Чому зростає інтенсивність процесу при стисканні?
5. Що таке контактний термічний опір?
6. Пояснити фізику імпульсного видалення вологи.
7. Чому виникає стрибок вологості?
8. Що таке трисекційна кінетика?
9. Охарактеризувати кожен період сушіння.
10. Яка роль моменту скидання тиску?
11. Що таке рівноважна вологість?
12. Як визначається швидкість сушіння?
13. Що таке адекватність моделі?
14. Які причини відхилення експерименту від моделі?
15. Як впливає товщина продукту?
16. Як впливає температура поверхонь?
17. Які похибки можливі?
18. Як підвищити ефективність процесу?
19. Де застосовується такий метод?
20. Які обмеження методу?

Лабораторна робота № 7

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРАКЦІЇ КАВИ З РІЗНИМ СТУПЕНЕМ ПОДРІБНЕННЯ

Мета роботи:

- 1) дослідити процес екстракції розчинних речовин із кавового порошку при фільтрації під тиском;
- 2) встановити вплив ступеня подрібнення кави на ефективність процесу;
- 3) визначити масу екстрагованих речовин та ступінь екстракції;
- 4) оцінити швидкість процесу екстракції.

Обладнання і матеріали:

кавоварка з паровим механізмом створення тиску; блок-ручка (портфільтр); кавомолка ударної дії (220 В); рефрактометр; аналітичні ваги; секундомір; мірний посуд; зерна кави; вода питна.

Література: [1], [2], [8].

1. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв. Х. : Світ Книг, 2021.
2. McCabe W. L., Smith J. C., Harriott P. Unit Operations of Chemical Engineering. McGraw-Hill, 2005.
3. Скрипник В. О. та ін. Mechanism of determining the kinetics of moisture content and temperature in meat during conductive drying. Journal of Chemistry and Technologies. 2024.

Методичні рекомендації

Під час підготовки до лабораторної роботи:

1. Ознайомитися з лекційним матеріалом. У разі відсутності конспекту лекцій скористатися теоретичним матеріалом, наведеним в дистанційному курсі за темою 17 «Екстрагування в системі рідина-тверде тіло». Опанувати теоретичний матеріал за питаннями, винесеними на допуск до лабораторної роботи

Питання на допуск до лабораторної роботи

1. Дати визначення процесу екстракції.
2. Які види екстракції використовуються в харчових технологіях?
3. У чому полягає фізична сутність процесу екстракції кави?
4. Які стадії включає процес екстракції з твердих матеріалів?
5. Що таке розчинні речовини кави?
6. Які фактори впливають на швидкість екстракції?
7. Як впливає розмір частинок на процес екстракції?
8. Що таке питома поверхня частинок і як вона змінюється?
9. Як впливає ступінь подрібнення на площу контакту фаз?
10. Що відбувається зі структурою шару при дрібному помелі?
11. Як змінюється проникність шару частинок?
12. Що таке гідравлічний опір шару?
13. Як впливає тиск на процес екстракції?
14. Що таке фільтрація під тиском?
15. Які параметри характеризують процес екстракції?
16. Що таке масова частка сухих речовин?
17. Який принцип роботи рефрактометра?
18. Що саме вимірює рефрактометр у даній роботі?
19. Що таке ступінь екстракції?
20. Як визначається швидкість процесу екстракції?
21. Які можливі похибки під час проведення експерименту?
22. Де використовується процес екстракції в харчовій промисловості?

На лабораторній роботі в лабораторії:

3. Отримати допуск до роботи.
4. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями.

Короткі теоретичні відомості

Екстракція кави є процесом вилучення розчинних речовин із твердих частинок у рідину при проходженні води через шар кавового порошку.

Процес включає:

- перехід розчинних речовин із внутрішніх областей частинок до їх поверхні;
- перехід речовин із поверхні частинок у потік рідини;
- перенесення речовин потоком води.

Інтенсивність процесу визначається:

- розміром частинок;
- площею їх поверхні;
- умовами руху рідини через шар.

При подрібненні кави:

- збільшується площа поверхні → підвищується інтенсивність екстракції;
- одночасно ущільнюється шар → зростає опір руху рідини.

У результаті процес екстракції визначається одночасною дією двох факторів – збільшенням площі поверхні та погіршенням умов фільтрації.

3. Провести експериментальні дослідження за наступною методикою

Методика проведення експерименту

3.1. Підготовка зразків

3.1.1. Взяти зерна кави.

3.1.2. Подрібнити каву протягом:

5 с – крупний помел;

10 с – середній помел;

15 с – дрібний помел.

3.2. Проведення експерименту

3.2.1. Зважити навішування кави, визначити масу m_0 , г.

3.2.2. Засипати каву в блок-ручку та ущільнити шар.

3.2.3. Встановити блок-ручку в кавоварку.

3.2.4. Підготувати посуд для збору напою.

3.2.5. Увімкнути процес екстракції.

3.2.6. Зафіксувати час екстракції τ , с.

3.2.7. Зібрати отриманий напій.

3.2.8. Визначити масу напою m_e , г.

3.2.9. Відібрати пробу напою.

3.2.10. Визначити масову частку сухих речовин C , % за допомогою рефрактометра.

3.2.11. Повторити дослід не менше 3 разів для кожного ступеня подрібнення.

3.2.12. Визначити середні значення вимірюваних величин.

3.3. Результати вимірювань занести в таблицю 7.1

Таблиця 7.1 – Результати експериментальних вимірювань

Ступінь помелу	τ_m , с	m_0 , Г	m_e , Г	τ , с	C , %
Крупний	5				
Середній	10				
Дрібний	15				

4. Здійснити необхідні розрахунки за наведеною методикою.

Методика розрахунків

4.1. Маса екстрагованих речовин

$$m_{ext} = m_e \cdot \frac{C}{100}$$

4.2. Ступінь екстракції

$$E = \frac{m_{ext}}{m_0} \cdot 100\%$$

4.3. Середня швидкість процесу екстракції

$$v = \frac{m_{ext}}{\tau}$$

4.4. Результати розрахунків занести в таблицю 7.2

Таблиця 7.2 – Результати розрахунків

Ступінь помелу	m_{ext} , г	E , %	v , г/с
Крупний			
Середній			
Дрібний			

5. Порівняти отримані значення для різних ступенів подрібнення кави. Встановити: залежність ступеня екстракції від розміру частинок; залежність швидкості процесу від ступеня подрібнення. Пояснити результати з урахуванням: зміни площі поверхні частинок; зміни умов проходження води через шар.

6. Оформити звіт по роботі.

Зміст звіту:

- 1) тема, мета роботи;
 - 2) вихідні дані;
 - 3) результати вимірювань (табл. 7.1);
 - 4) результати розрахунків (табл. 7.2);
 - 5) аналіз результатів;
 - 6) висновки.
7. Захистити роботу перед викладачем за наступними питаннями.

Питання на захист лабораторної роботи

1. Пояснити фізичну сутність процесу екстракції кави.
2. Які стадії включає процес екстракції?

3. Які фактори визначають інтенсивність процесу?
4. Як впливає розмір частинок на швидкість екстракції?
5. Чому при дрібному помелі можливе зниження ефективності процесу?
6. Що відбувається зі структурою шару при подрібненні?
7. Як змінюється гідравлічний опір шару?
8. Як впливає ущільнення шару на процес?
9. Яку роль відіграє тиск у процесі екстракції?
10. Що вимірює рефрактометр?
11. Як визначається масова частка сухих речовин?
12. Як розраховується маса екстрагованих речовин?
13. Що таке ступінь екстракції та як він визначається?
14. Як визначається швидкість процесу?
15. Які похибки можуть виникати під час вимірювань?
16. Як впливає температура води на процес?
17. Як впливає час контакту фаз?
18. Як можна підвищити ефективність екстракції?
19. Де застосовується процес екстракції в харчових технологіях?
20. Які обмеження має проведений експеримент?

8. РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

Основні

1. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв : Підручник / 2-ге вид. доп. та випр. Х. : Світ Книг, 2021. 496 с.

2. Процеси і апарати харчових виробництв : Підручник / За ред. І. Ф. Малежика. К. : НУХТ, 2003. 400 с.

Допоміжні

3. Conductive Frying Of Meat : Current State And Prospects : Monographia / comp. Skrypnyk V., Yeleussinov B., Semenov A. Kuzylorda: 2025. 374 p. URL : https://www.researchgate.net/profile/Viacheslav-Skrypnyk?ev=hdr_xprf (дата звернення: 01.09.2025).

4. Підвищення енергетичної і ресурсної ефективності процесів і апаратів кондуктивного жарення м'яса : монографія / Скрипник В. О., Молчанова Н. Ю., Фарісеєв А. Г., Тарасенко Д. С. Полтава : ПП «Астрая», 2024. 274 с. URL : <http://dspace.puet.edu.ua/handle/123456789/13830>. (дата звернення: 01.09.2025).

5. Viacheslav O. Skrypnyk, Anatolii O. Semenov, Bogdan H. Ponomarenko, Andrii H. Farisieiev. Mechanism of determining the kinetics of moisture content and temperature in meat during conductive drying. Journal of Chemistry and Technologies. 2024, 32(1), 89-98. DOI: <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.285130>.

6. Skrypnyk V., Semenov A., Bychkov Y., Farisieiev A. Results of determining the influence of moisture content on the flow of substances in meat under the combined action of heat flow and electric current. Slovak International Scientific Journal. 2024, №83, 50–56. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.11188969>.

7. Скрипник В. О., Пономаренко Б. Г. Результати визначення кінетики вологовмісту і температури в м'ясі за кондуктивного сушіння із стисненням. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка, № 45 (2024). С. 85-94. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2024-4.12>.

Інформаційні ресурси

8. Процеси і апарати харчових виробництв : Дистанційний курс для вивчення дисципліни / В. Скрипник. Полтава : ПДАА, 2023. <https://moodle.pdaa.edu.ua/course/view.php?id=3366> (дата звернення: 01.09.2025).

9. Офіційний сайт Міністерства освіти, науки, молоді та спорту: <http://www.mon.gov.ua> (дата звернення: 01.09.2025).

10. Офіційний сайт Наук.-метод. центру аграрної освіти: <http://www.smcae.com.ua>. (дата звернення: 01.09.2025).

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1. ПЕРЕДУМОВИ ВИВЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ	4
2. КОМПЕТЕНТНОСТІ	4
3. ПРОГРАМНІ РЕЗУЛЬТАТИ НАВЧАННЯ	4
4. ОРГАНІЗАЦІЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	5
5. ШКАЛА ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА ЇХ ЗАХИСТУ	6
6. ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	6
7. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ	7
Лабораторна робота № 1. Застосування теорії подібності при моделюванні процесів та апаратів харчових виробництв (теоретично-розрахункова, ввідна)	8
Лабораторна робота № 2. Дослідження процесу осадження твердих тіл у рідкому середовищі	19
Лабораторна робота № 3. Вивчення процесу подрібнення в молотковій дробарці	23
Лабораторна робота № 4. Дослідження роботи компресійної холодильної установки	27
Лабораторна робота № 5. Дослідження процесу кондуктивного жарення м'яса в умовах стиснення	31
Лабораторна робота № 6. Дослідження процесу кондуктивного сушіння м'яса в умовах стиснення	37
Лабораторна робота № 7. Дослідження процесу екстракції кави з різним ступенем подрібнення	42
8. РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ	47
ЗМІСТ	48