**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО**

**Механіко-технологічний факультет**

Кафедра ОПХВ імені професора Ф.Ю. Ялпачика

# ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВОЇ І ПЕРЕРОБНОЇ ГАЛУЗІ

**Методичні вказівки до практичної роботи на тему:**

## "Дослідження гідродинаміки процесу псевдозрідження зернистих матеріалів "

для здобувачів ступеня вищої освіти "Доктор філософії"
механіко-технологічного факультету
спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"
ОНП "Галузеве машинобудування"

**м. Мелітополь - 2021**

**ПРОЦЕСИ І АПАРАТИ ХАРЧОВОЇ І ПЕРЕРОБНОЇ ГАЛУЗІ.** Методичні вказівки до практичної роботи на тему: «Дослідження гідродинаміки процесу псевдозрідження зернистих матеріалів» для здобувачів ступеня вищої освіти «Доктор філософії» механіко-технологічного факультету зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» - Мелітополь: ТДАТУ імені Дмитра Моторного, 2021. – 22 с.

**Розробники** Самойчук К.О., д.т.н., проф.
Бойко В.С., к.т.н., доцент

**Рецензент**: Мілько Д.О., д.т.н., професор кафедри машиновикористання в землеробстві

Розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри ОПХВ імені професора Ф.Ю. Ялпачика

Протокол № 1 від 27 серпня 2021 року.

Затверджено методичною комісією механіко-технологічного факультету, протокол № 10 від 31 серпня 2021 року.

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ ЗЕРНИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

**Мета роботи:** вивчити процес переходу стаціонарного (нерухливого) шару зернистого матеріалу в псевдозріджений (рухливий); визначити основні гідродинамічні характеристики псевдозрідженого шару (еквівалентний діаметр часток, порозність, критичну і фактичну швидкість повітря при кипінні, гідравлічний опір).

Час виконання роботи 4 год.

### 1 Порядок виконання роботи

- розглянути основні теоретичні положення процесу псевдозрідження, область його застосування в переробній галузі;
- ознайомитись з принципом дії та будовою експериментальної лабораторної установки та іншим обладнанням робочого місця;
- ознайомитись з вимогами техніки безпеки при проведенні роботи;
- провести експериментальні дослідження згідно з методикою проведення роботи;
- обробити результати експерименту та сформулювати висновки;
- скласти та оформити звіт з лабораторної роботи.

### 2 Завдання для самопідготовки

У процесі підготовки до заняття студент повинен:

- ***повторити:*** основні поняття з теорії процесу псевдозрідження двофазних систем;

- ***знати:***

- основні закономірності утворення псевдозрідженого шару, застосування ефекту псевдозрідження в технологічних процесах харчових і переробних виробництв;

- ***вміти:*** проводити налаштування лабораторної експериментальної установки і проводити дослідження з її використанням, обробляти результати експерименту, формулювати висновки, давати рекомендації з практичного використання ефекту псевдозрідження в виробництві.

## 3 Основні теоретичні положення

Псевдозрідженням називається такий стан двофазної системи тверді частки – газ (або рідина), яке характеризується переміщенням твердих часток відносно один одного за рахунок підведення енергії, від якого або джерела.

Сутність псевдозрідження полягає у тому, що під час продування газу (повітря) або рідини з певною швидкістю через шар зернистого матеріалу, що розташований на решітці, він переходить у завислий стан, набуває властивості текучості та переміщується. Зовні такий шар нагадує киплячу рідину, тому його ще називають киплячим шаром.

Процеси, що реалізуються у киплячому шарі, останнім часом одержали широке розповсюдження в різних галузях харчової технології. У псевдозрідженому шарі проводяться процеси змішування, теплообміну, сушіння, абсорбції та ін. Особливо часто інтенсивно впроваджується псевдозрідження в процеси сушіння зерна, цукру-піску, желатину, дріжджів та інших зернистих, а також рідинних матеріалів.

Тверді частинки в киплячому шарі завдяки плинності можна переміщувати по трубах, що дозволяє створювати апарати безперервної дії, що порівняно прості, легко механізуються і автоматизуються.

Псевдозріджений шар утворюється при висхідному русі зріджувального агента через шар зернистого матеріалу зі швидкістю, що дозволяє підтримувати шар матеріалу у зваженому стані.

У повітряному потоці завислий шар зернистого матеріалу утворюється при використанні близьких по розміру округлих часточок з еквівалентним діаметром від сотих частин міліметра (борошно, крохмаль) до декількох сантиметрів (драже, соя, горіхи). Для того, щоб усі частки переходили у зважений шар одночасно і не створювали окремих застійних зон або інтенсивного фонтанування потрібно дотримуватися умови щоб вага окремих часток відрізнялася не більше чим на порядок, а лінійний розмір (еквівалентний діаметр) часточок при однаковій щільності не відрізнявся більше чим у 2,14 рази.

Для встановлення гідродинамічної сутності процесу розглянемо три величини, що характеризують нерухомий шар зернистого матеріалу: порізність шару $\varepsilon$, висоту шару $h$ і діаметр частинок $d$.

Порізність зернистого шару – це відношення вільного об'єму між зернами до всього об'єму шару:

$$\varepsilon = V_n / V = (V - V_m)/V = 1 - (V_m / V), \qquad (1)$$

$V_n$ - вільний об'єм; $V$ - повний об'єм шару; $V_m$ - сумарний об'єм всіх твердих частинок.

Якщо газ рухається через шар зернистого матеріалу, то залежно від середньої швидкості його руху можливі три варіанти взаємодії (рисунок 1): фільтрування, псевдозрідження та транспортування завислих частинок потоком.

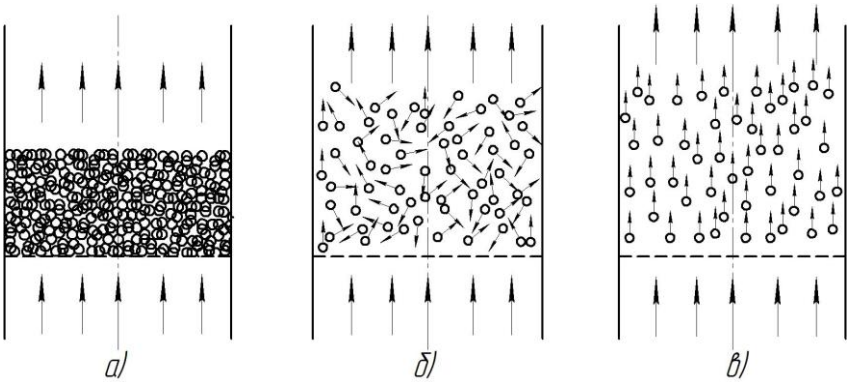


Рисунок 1 – Схема утворення псевдозрідженого шару

В стані фільтрації (рисунок 1 а) коли частинки зернистого шару залишаються нерухомими порізність шару $\varepsilon$ залишається незмінною і дорівнює приблизно ***0,4***.

Зі збільшенням швидкості газу до значення, при якому підіймальна сила потоку стає рівною вазі шару частинок набуває текучості та переходить у псевдозріджений стан. Швидкість потоку $v_1$, що відповідає цьому моменту, називається першою критичною швидкістю, або швидкістю початку псевдозрідження (рисунок 1 б). При цьому значення порозності $0{,}4 < \varepsilon < 1{,}0$.

У такому стані шар становить систему, яка може бути прийнятою за дисперсну. Таким чином псевдозрідження відносять до процесів утворення дисперсних систем.

За більшої швидкості потоку газу підіймальна сила стає більшою за вагу шару, частинки захоплюються потоком і починають переміщатися разом з ним тобто починається процес транспортування матеріалу (рисунок 1 в). Транспортування частинок рідинним потоком називають гідротранспортом, а транспортування повітрям – пневмотранспортом. Швидкість $\boldsymbol{v_2}$, яка відповідає цьому моменту, називається другою критичною швидкістю, або швидкістю винесення.

Залежність гідравлічного опору зернистого шару від середньої швидкості руху газу через шар наведена на рисунку 2.

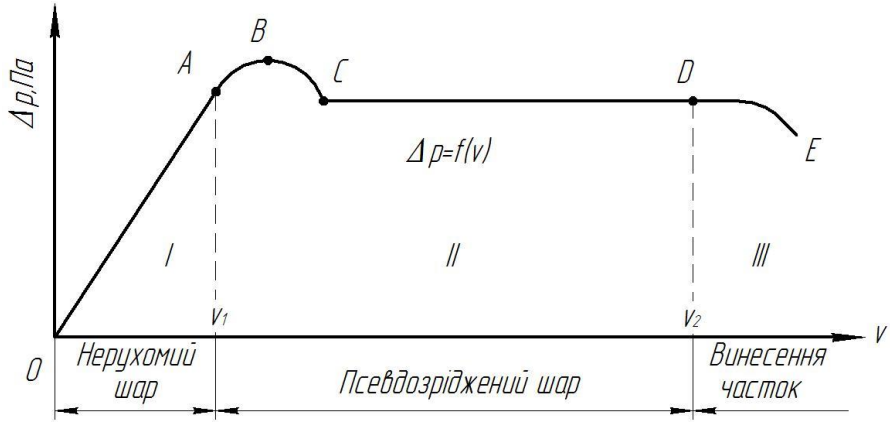


Рисунок 2 – Крива псевдозрідження для дисперсних часток

Гідравлічний опір псевдозрідженого шару – це різниця тиску газу під газорозподільною решіткою і на верхній межі шару:

$$\boldsymbol{\Delta p = p_1 - p_2}\,. \tag{2}$$

Середньою швидкістю газу є швидкість у вільному перерізі апарата:

$$\boldsymbol{v = 4Q_V \big/ (\pi \cdot D^2)}\,, \tag{3}$$

де $\boldsymbol{Q_V}$ - об’ємна витрата газу; D - діаметр циліндричного апарата.

Лінія ***OABCDE*** – є графік гідравлічного опору зернистого шару. На ділянці ***OA*** відбувається фільтрування газу через нерухомий зернистий шар. Потім у точці ***A*** шар починає розширюватись – утворюється псевдо зріджений шар, а в точці ***B*** досягається максимум різниці тиску, яка потрібна для подолання зчеплення частинок в зернистому шарі.

Лінія ***ABCD*** відповідає псевдозрідженому шару, гідравлічний опір якого постійний і не залежить від швидкості руху газу, яка змінюється в межах від $v_1$ до $v_2$ за рахунок змінення порізності. У т***оч***ці D починається винесення завислих частино із шару і лінія ***DE*** на графіку відповідає початку процесу пневмотранспорту.

У зв'язку з тим, що частинки в шарі мають різні розміри, тобто шар є полідисперсним, перехід його у псевдозріджений стан відбувається поступово. Оптимальне (робоче) значення швидкості псевдозрідження $v$, що забезпечує інтенсивне перемішування киплячого шару є можливим за порозності частинок $\varepsilon = 0{,}55...0{,}75$. Відношення оптимальної швидкості $v$ до першої критичної $v_1$ називаються коефіцієнтом псевдозрідження:

$$K_n = v/v_1 . \qquad (4)$$

Оптимальному зрідженню відповідає значення $K_n = 2...3$. Для кожного випадку $K_n$ визначається експериментально.

Крім формули (1) величину порозності $\varepsilon$ шару можна визначити за наступним виразом:

$$\varepsilon = \frac{H_ш - H_{тв}}{H_ш}, \qquad (5)$$

де $H_ш$ і $H_{тв}$ - висота псевдозрідженого і твердого шару, м;

Коли всі частки шару перейдуть у зважений стан, тиск повітря під шаром $\Delta p_c$ повинен подолати вагу часточок, яка на одиницю площі поперечного перерізу $S$ апарата.

Таким чином:

$$\Delta p_ш = G_ш / S, \qquad (6)$$

де $G_ш$ - вага всіх часточок шару, кг;

$S$ - площа поперечного перерізу колони апарата, м$^2$.

З рівняння (6) випливає, що у період псевдозрідження гідравлічний опір шару $\Delta p_ш$ не залежить від швидкості повітря, і залишився практично постійним на всьому діапазоні існування шару. Постійність значення $\Delta p_ш$ пояснюється тим, що при підвищенні витрати повітря і його фіктивної швидкості $v_ф$ одночасно збільшується об'єм зваженого шару і відстань між частками, однак дійсна швидкість повітря, від якої залежить гідравлічний опір шару, не змінюється.

Під фіктивною швидкістю повітря $v_ф$ розуміють його об'ємну витрату $V$ віднесену до площі поперечного перерізу апарата:

$$v_ф = V / S, \qquad (7)$$

де $V$ – витрата повітря, м$^3$/с; $S$ - площа перерізу апарата, м$^2$.

Еквівалентний діаметр часточок $d_e$ будь-якої форми знаходиться як діаметр кулі, яка за об'ємом дорівнює об'єму частки.

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi \cdot n \cdot \rho_{тв}}}, \qquad (8)$$

де $d_e$ - еквівалентний діаметр частки, м; $m$ - маса часток у пробі, кг; $n$ - кількість часток у пробі; $\rho_{тв}$ - щільність твердих часток, кг/м$^3$.

Середні значення щільності твердих часток деяких зернових матеріалів наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Середні значення щільності зернових матеріалів

| Зерновий матеріал | горох | пшениця | просо | гречка |
|---|---|---|---|---|
| Значення $\rho_{тв}$, кг/м$^3$ | 1360 | 1320 | 1120 | 1040 |

Вимірявши, розміри окремих округлих часточок (зерен) можна знайти їх еквівалентний діаметр із меншою точністю за формулою:

$$d_e = k_ф \cdot d_c, \tag{9}$$

де $d_c$ - середній арифметичний діаметр часточок, м;

$k_ф$ - коефіцієнт форми.

При розрахунках приймається: для пшениці $k_a = 0{,}75$, для ячменю $k_ф = 0{,}72$, для гречки $k_ф = 0{,}77$, для кукурудзи $k_ф = 0{,}79$, для сої $k_ф = 0{,}92$.

Для гідравлічного розрахунку апаратів із псевдозрідженим шаром використовують емпіричну критеріальну залежність Рейнольдса, тобто $Re_{кр}$ – критичне значення числа Рейнольдса, при якому зернистий шар переходить у рухливий зважений стан:

$$Re_{кр} = \frac{v_{кр} \cdot d_e \cdot \rho_{пв}}{\mu_{пв}}, \tag{10}$$

де $\rho_{пв}$ і $\mu_{пв}$ - щільність (кг/м$^3$) і динамічна в'язкість (Па·с) повітря.

Критичне число Рейнольдса при значенні порозності $\varepsilon = 0{,}4$ можна визначити за формулою О. Тодеса.

$$Re_{кр} = \frac{A\tau}{1400 + 5{,}22\sqrt{A\tau}}, \tag{11}$$

де $A\tau$ - критерій Архімеда.

$$A\tau = \frac{d_e^3 \cdot \rho_{пв}(\rho_{тв} - \rho_{пв})g}{\mu_{пв}^2}. \tag{12}$$

Якщо щільністю повітря у різниці щільності твердих часток і повітря зневажити, то одержимо формулу

$$A\tau = \frac{d_e^3 \cdot \rho_{пв} \cdot \rho_{тв} \cdot g}{\mu_{пв}^2}. \tag{13}$$

Використовуючи наведені залежності, можна визначити значення $A\tau$ і $Re_{кр}$, а потім швидкість повітря, при якій шар зернистого матеріалу переходить у зріджений стан.

## 4 Оснащення лабораторної роботи пристроями і приладами

Робоче місце роботи укомплектоване установкою для експериментального визначення параметрів процесу псевдозрідження (рисунок 3) та контрольно-вимірювальними приладами, як-то диференціальними манометрами, аналітичними вагами ВЛКТ-50М, штангенциркулем ШЦ-125 з межею вимірів 0…125 мм із точністю 0,1мм, лінійкою креслярською 0…300 мм, стаканчиками для зернового матеріалу, зернового матеріалу.

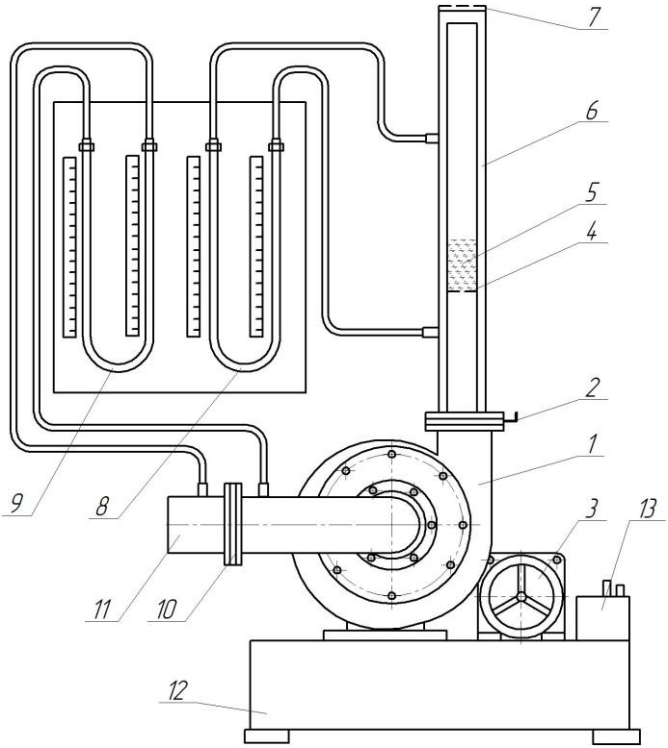


Рисунок 3 – Установка для дослідження процесу псевдозрідження

1 - вентилятор; 2 - заслінка; 3 - електродвигун; 4 - розпилювальна решітка; 5 - зерновий шар; 6 - колона; 7 - загороджувальна сітка; 8 - диференціальний манометр колони; 9 - диференціальний манометр діафрагми; 10 - діафрагма витратоміра повітря; 11 - усмоктувальний патрубок; 12 - основа установки; 13 - пусковий автомат.

Рисунок 4 – Фото лабораторної установки

Лабораторна експериментальна установка для визначення параметрів процесу псевдозрідження складається з металосклянної колони 6.

Над газорозподільним простором колони встановлена розподільна решітка 4, на якій розміщається шар 5 зернового матеріалу.

У верхній частині колони закріплена сітка 7 для затримки зернистого матеріалу при його можливому виносі за межі колони.

Повітря в колонку подається вентилятором 1 через діафрагму 10 і регулюється заслінкою 2. Витрата повітря визначається двома диференціальними манометрами 8 і 9 установленими на спеціальному стенді 11. Привод вентилятора здійснюється електродвигуном 12 за допомогою клинопасової передачі.

## 5 **Методика проведення лабораторної роботи**

1. Виконати тарування діафрагми 10. Для цього за допомогою заслінки діафрагми змінювати, поперечний переріз усмоктувального каналу вентилятора. При кожному положенні заслінки слід фіксувати показання диференціального манометра діафрагми **9**.

Для побудови тарувальної кривій число точок тарування повинне бути не менш п’яти.

Таблиця 1 – Дані тарування діафрагми установки

| Номер досліду | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Delta p_д$ | в мм водяного стовпа | | | | | |
| | в Па | | | | | |
| $V$ | м$^3$/с | | | | | |

Подача повітря $V$ визначається за формулою:

$$V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_д}{\rho_{пв}}} \qquad (14)$$

де $\alpha$ - коефіцієнт подачі, що залежить від типу і розміру звужуючого пристрою і фізичних властивостей потоку; $\varepsilon$ - поправочний коефіцієнт розширення, що вводиться при вимірі витрати газів і пари; $d$ - діаметр звужуючого пристрою.

За отриманими параметрами побудувати тарувальний графік діафрагми $\Delta p_д = f(V)$

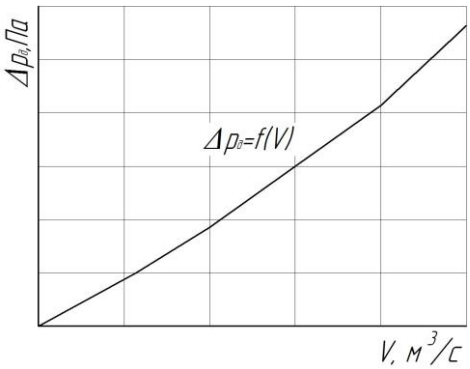


Рисунок 3 – Графік визначення витрати повітря за перепадом тиску на діафрагмі

2. Визначити масу $m$ часточок у пробі зважуванням на аналітичних вагах ВЛКТ-50М.

3. Виміряти розміри 20 зерен досліджуваного матеріалу і розрахувати еквівалентний діаметр за виразом:

$$d_e = k \cdot d_c \qquad (15)$$

Для більш точного визначення еквівалентного діаметра зерен розрахувати його за формулою:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi \cdot n \cdot \rho_{тв}}}. \qquad (16)$$

4. Засипати зважену пробу зернового матеріалу в скляну колонку 6 установки на решітку 4. Перед початком експерименту перевірити, щільність закриття заслінки 2.

5. Ввімкнути вентилятор і при поступовому відкритті заслінки 2 встановити таку подачу повітря в колонку, щоб показання дифманометра 8 було не більш ніж 100 Па (10 мм вод. ст.). Потім збільшити потік повітря таким чином, щоб перепад тиску у кожному наступному досліді збільшувався не більше ніж на 30…50 Па.

Подачу повітря збільшувати до настання режиму повного псевдозрідження з інтенсивним перемішуванням, не допускаючи віднесення часточок вгору до уловлювальної сітки. Закінчити досліди при настанні моменту виносу часточок (точка ***D*** кривої псевдозрідження).

6. У кожному досліді замірити висоту $H_c$ зернового шару, гідравлічний опір часток $\Delta p_ш$, гідравлічний опір діафрагми $\Delta p_д$ і записати характеристики зернового шару (нерухливий, набряклий, рухливий, псевдозріджений).

7. Експериментальні і розрахункові дані занести в таблицю 2.

Таблиця 2 – Параметри процесу псевдозрідження

| Номер досліду | Висота шару $H_c$, м | Гідравлічний опір шару $\Delta p_ш$, Па | Гідравлічний опір діафрагми $\Delta p_д$, Па | Подача повітря $V$, м$^3$/с | Швидкість повітря $v_{ср}$, м/с | Характеристика стану шару |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | | | | | | |
| 2 | | | | | | |
| 3 | | | | | | |
| 4 | | | | | | |
| 5 | | | | | | |
| 6 | | | | | | |

## 6 Обробка результатів експерименту

а) Визначити критерій Архімеда за формулою (12)

$$A\tau = \frac{d_e^3 \cdot \rho_в \cdot \rho_{тв} \cdot \rho_{пв} \cdot g}{\mu_{пв}^2}.$$

б) За формулою Тодеса (формула 11) визначити значення критичного числа Рейнольдса.

$$Re_{кр} = \frac{A\tau}{1400 + 5{,}22\sqrt{A\tau}}$$

в) Розраховуємо критичну теоретичну швидкість $v_{кр.т}$ повітря при якій зерновий шар переходить у псевдозріджений стан.

$$v_{кр.т} = \frac{R_{е.кр} \cdot \mu_{пв}}{d_э \cdot \rho_{пв}}.$$

г) Знаючи перепад тиску діафрагми $\Delta p_д$ за допомогою тарувального графіка знайти подачу повітря $V$ і занести дані в таблицю 2.

д) Визначити фіктивну швидкість повітря $v_ф$ за формулою

$$v_ф = \frac{V}{S},$$

де $S$ - площа поперечного перерізу колони апарата, м$^2$.

е) За експериментальним даними побудувати графік залежності $\Delta p_c = f(v_ф)$. За графіком визначити критичну швидкість $v_{кр}$ початку псевдозрідження і критичну швидкість виносу $v_{вин}$ для зернового матеріалу, що досліджується.

ж) Отримані експериментально і теоретично значення критичної швидкості повітря порівняти і знайти величину розбіжності.

$$\theta_v = \frac{v_{кр.ек} - v_{кр.теор.}}{v_{кр.ек}} \cdot 100\% \qquad (17)$$

з) Охарактеризувати поведінку зернистого шару при різних швидкостях руху повітря (однорідність шару, ступінь і рівномірність перемішування, наявність повітряних пухирів, фонтанування).

## 7 Вимоги безпеки

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

## 8 Контрольні питання

1 Окресліть сферу використання явища псевдозрідження в харчовій і переробній промисловості.

2 Крива псевдозрідження і її основні ділянки, їх характеристика.

3 Охарактеризуйте поняття фіктивної, дійсної і критичної швидкості повітря при псевдозрідженні?

4 Що являє собою порозність шару часток, і в яких межах її значення змінюється?

5 Назвіть основні етапи зрідження і стани псевдозрідженого шару.

6 Критичне число Рейнольдса, його сутність і застосування.

7 Що таке еквівалентний діаметр часток і яким чином його значення визначається?

8 Критерій Архімеда його сутність і від яких складових залежить його значення?

9 Опишіть будову експериментальної лабораторної установки і порядок проведення дослідів на ній.

10 Чому зі збільшенням фіктивної швидкості повітря гідравлічний опір нерухливого шару зростає, а опір зваженого шару залишається постійним?

## 9 Тестові завдання

**1) Яка різниця лінійного розміру часточок при їх однаковій щільності гарантує стабільне досягнення ефекту псевдозрідження?**

а) в $3{,}14^2$ разів б) в 3,14 разів в) в 2,14 рази

**2) Як називають етап процесу псевдозрідження коли шар часток залишається нерухомим і зберігає первинний об’єм?**

а) фільтрування; б) зріджування; в) транспортування.

**3) Як називають швидкість при якій частки шару переходять у псевдозріджений стан?**

а) перша критична швидкість; б) друга критична швидкість; в) фіктивна швидкість.

**4) Який етап на кривій псевдозрідження характеризує значення другої критичної швидкості?**

а) кінець фільтрування; б) кінець псевдозрідження; в) кінець транспортування.

**5) Яким типом манометрів оснащена лабораторна експериментальна установка ?**

а) диференційного типу; б) деформаційного типу; в) дифракційного типу.

**6) Вкажіть значення порозності частинок, що при оптимальній швидкості забезпечує інтенсивне перемішування киплячого шару**.

а) $\varepsilon < 0,4$; б) $\varepsilon = 0,55...0,75$; в) $\varepsilon > 1,0$.

**7) Вкажіть вірну формулу для визначення порозності часток.**

а) $\varepsilon = (V - V_m)/V$; б) $\varepsilon = 1 - (V_m/V)$; в) обидві формули.

**8) Яка з наведених формул для визначення еквівалентного діаметра частки має більшу точність?**

а) $d_e = \sqrt[3]{\dfrac{6m}{\pi \cdot n \cdot \rho_{тв}}}$, б) $d_e = k_ф \cdot d_c$; в) обидві формули.

**9) Яка з формул є формулою для визначення фіктивної швидкості?**

а) $v = 4Q_V / (\pi \cdot D^2)$; б) $v = R_{е.кр} \cdot \mu_{пв} / (d_э \cdot \rho_{пв})$ в) $v = V/S$.

**10) Яким пристроєм регулюється подача повітря в установку?**

а) заслінкою; б) реостатом двигуна; в) манометром

## Література


1. Черевко О.І. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. - Х.: Світ Книг, 2014. - 495 с.

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

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