

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ
ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №3
з курсу "Процеси і апарати хімічної технології"
для студентів хіміко-технологічних спеціальностей

ЛЬВІВ – 2013

Дослідження процесу псевдозрідження дисперсного матеріалу.
Інструкція до лабораторної роботи №3 з курсу "Процеси і апарати хімічної технології" для студентів хіміко-технологічних спеціальностей. /Укл.: Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., Ковальчук О.В. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. – 13 с.

Укладачі:

Атаманюк В.М., канд. техн. наук, доцент,
Кіндзера Д.П., канд. техн. наук, доцент,
Ковальчук О.В. канд. техн. наук, доцент.

Рецензент:

Дулеба В.П., канд. техн. наук, доцент
Скорохода В.Й. канд. хім. наук, доцент

МЕТА РОБОТИ

Ознайомитись з механізмом псевдозрідження шару зернистого матеріалу і методами визначення фіктивної швидкості руху газової фази, швидкості псевдозрідження та другої критичної швидкості.

ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Тепло- та масообмінні процеси, які протікають при наявності твердих дисперсних матеріалів можна інтенсифікувати, якщо проводити їх у стані псевдозрідження. Крім цього, використання ефекту псевдозрідження дозволяє організувати неперервні процеси, оскільки система газ-твердий дисперсний матеріал у стані псевдозрідження стає текучою, як рідина (власне тому відповідне явище називається псевдозрідженням).

Для псевдозрідження зернистих матеріалів використовуються пристрої, (рис. 1), головними елементами яких є ємність 1, розділена на дві частини горизонтальною перфорованою перегородкою 2, на якій розміщений шар зернистого матеріалу 3, а знизу подають газ (або рідину).

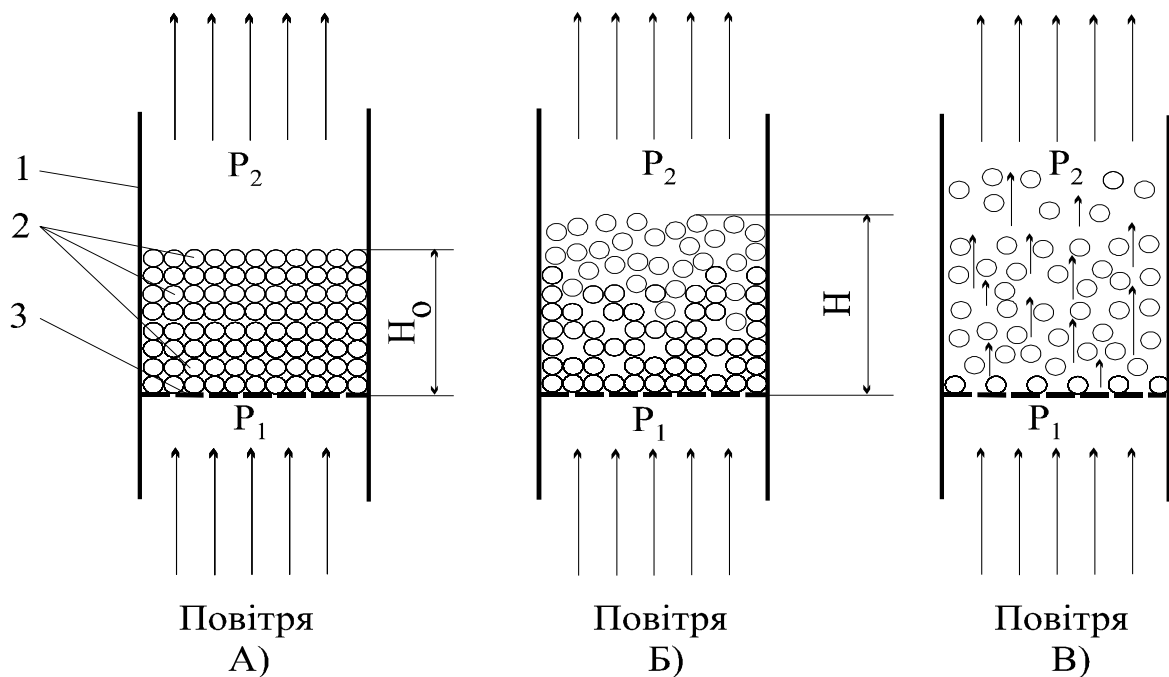


Рис.1. Схематичне зображення стану шару дисперсного матеріалу при русі крізь нього висхідного потоку газу:

а) стаціонарний шар; б) псевдозрідження; в) винесення (пневмотранспорт).

На рис. 1, зображені три можливих стани шару твердих частин, які мають місце при різних швидкостях руху газу або рідини, що подаються знизу вверх (стаціонарний шар, псевдозрідження і пневмотранспорт).

Стаціонарний шар. Коли швидкості руху газу (рідини) крізь шар є незначними (рис. 1а), то шар залишається нерухомим і його характеристики (висота, питома поверхня, пористість, еквівалентний діаметр каналів в зернистому шарі) залишаються незмінними.

Швидкість газового потоку, віднесена до всього поперечного перерізу апарату називається фіктивною швидкістю газу і позначається ω_0 .

$$\omega_0 = \frac{V}{S} \quad (1)$$

де V – об’ємна витрата газу, $\text{м}^3/\text{с}$; S – площа поперечного перерізу шару, м^2 .

Дійсна швидкість газового потоку крізь шар твердих частинок ω зв’язана з фіктивною співвідношенням:

$$\omega = \frac{\omega_0}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

де ε_0 – пористість нерухомого шару (пористість - це частка порожнин в шарі зернистого матеріалу, яку вимірюють у $\text{м}^3/\text{м}^3$). Залежність (2) справедлива і для псевдозрідженого шару, але у цьому випадку в неї вводиться пористість останнього – ε □ .

Збільшення фіктивної швидкості ω_0 приводить до відповідної зміни дійсної швидкості руху теплоносія ω , що, згідно з рівнянням Дарсі–Вейсбаха, стає наслідком збільшення перепаду тисків:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho_c \cdot \omega^2}{2} \quad (3)$$

де λ – загальний коефіцієнт опору, який лише формально відповідає коефіцієнтові тертя, що входить в залежність для розрахунку гідравлічного опору трубопроводу під час руху по ньому рідини чи газу. Загальний коефіцієнт опору λ відображає вплив опору тертя та місцевих опорів, що виникають під час руху рідини по кривизні каналів шару матеріалу та обтіканні нею окремих елементів шару.

H – висота шару, м; ρ_c – густина газу, $\text{кг}/\text{м}^3$; d_e – еквівалентний діаметр каналів в зернистому матеріалі, крізь які рухається газовий потік, м:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a} \quad (4)$$

a – питома поверхня шару зернистого матеріалу, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Еквівалентний діаметр може бути вираженим також через діаметр частинок, з яких складається шар:

$$d_e = \frac{2 \cdot \Phi \cdot \varepsilon \cdot d}{3 \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (5)$$

d – діаметр частинок матеріалу, м ; Φ – фактор форми. Для круглих частинок $\Phi=1$.

Киплячий шар. Коли швидкість руху газу (або рідини) досягає деякого критичного значення, шар матеріалу перестає бути нерухомим, його пористість і висота починають зростати, шар набуває текучості і переходить у киплячий (псевдозріджений) стан. Тверді частинки інтенсивно переміщуються в потоці в різних напрямках - весь шар нагадує киплячу рідину. Швидкість, при якій порушується стаціонарність шару і він починає переходити в псевдозріджений стан, називають першою критичною швидкістю або *швидкістю псевдозрідження*. Початком псевдозрідження вважається момент, коли сили гідравлічного опору шару зрівноважуються з вагою усіх частин останнього.

Вираз для розрахунку робочого (експериментального) значення пористості шару при зміні його висоти:

$$\varepsilon = 1 - \frac{H_0}{H} \cdot (1 - \varepsilon_0) \quad (6)$$

(Значення пористості нерухомого шару кулястих частинок $\varepsilon_0=0,43$)

Межі існування псевдозрідженого шару є обмеженими знизу швидкістю псевдозрідження і зверху – другою критичною швидкістю. Коли відбувається зростання швидкості газу в межах $\omega_{пз} \div \omega_{крит.2}$, псевдозріджений шар зернистого матеріалу поступово розширюється, його висота збільшується, і як показують експериментальні дослідження, втрати напору при цьому залишаються практично постійними (див. рис. 2).

Апарати з киплячим шаром використовують в промисловості для змішування сипких матеріалів, для проведення процесів теплообміну, сушіння, адсорбції, капсулювання, каталітичних та інших процесів

Витання – стан в системі, коли пористість шару стає настільки великою (наближується до 1), що рух кожної окремої частини можна вважати незалежним від дії інших частин шару. Тому, *швидкість витання* – це швидкість, при досягненні якої кожна окрема частинка вільно витає, не осідає і

не виноситься потоком з апарату при умові що її вага в середовищі зрівноважується силою гідравлічного опору, що виникає під час її обтікання потоком рідини чи газу. Найменше перевищення фіктивної швидкості ω_0 над величиною швидкості витання $\omega_{\text{вит}}$ спричиняє винесення частинки.

Транспортування. Швидкість руху газової фази, при досягненні якої відбувається руйнування шару і починається масове винесення частин рухомим потоком газу, називають другою критичною швидкістю. Явище масового винесення твердих частинок потоком газу називають пневмотранспортом і використовують в промисловості для переміщення сипких матеріалів.

Характерний графік зміни перепаду тисків (гідравлічного опору) від фіктивної швидкості руху газу крізь шар дисперсного матеріалу показаний на рисунку 2. Під час збільшення фіктивної швидкості газу аж до швидкості псевдозрідження, опір зернистого шару зростає (лінія ABC). Однак, перепад тисків в шарі безпосередньо перед початком псевдозрідження (точка B), є дещо більшим тієї величини, яка є необхідною для підтримання шару у зваженому стані. Це пояснюється дією сил щеплення між частинками шару.

Коли швидкість руху газу досягає швидкості псевдозрідження (точка C), частинки долають сили щеплення і перепад тисків стає рівним вазі частинок, яка припадає на одиницю площі апарату. Ця умова виконується для всієї області існування псевдозрідженого шару (лінія CE), аж до моменту, коли швидкість досягає другого критичного значення, при якому шар руйнується і починається масове винесення частин рухомим потоком газу, після чого перепад тисків починає спадати (ділянка RS).

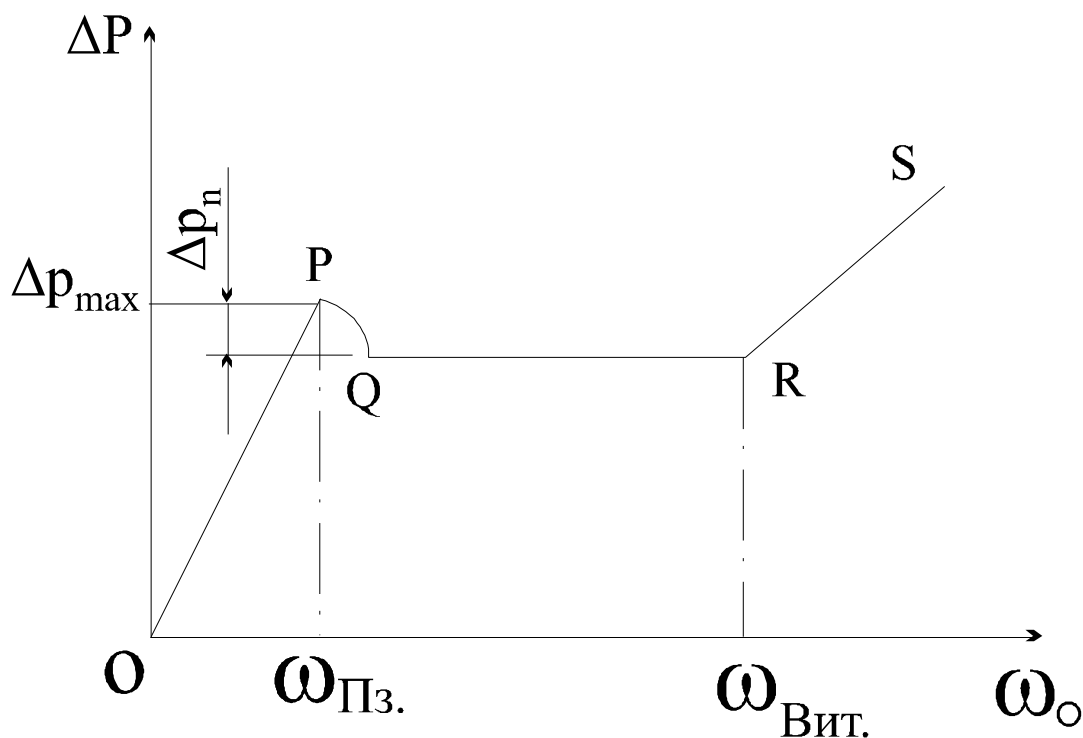


Рис. 2. Схематичний графік залежності перепаду тисків ΔP в псевдозрідженому шарі від фіктивної швидкості газу ω_0

Першу критичну швидкість, швидкість псевдозрідження $\omega_{пз}$, можна розрахувати визначивши критерій Архімеда Ar та значення критерія Рейнольдса у момент псевдозрідження згідно залежностей:

$$Ar = \frac{d^3 \cdot \rho_c \cdot (\rho - \rho_c)}{\mu_c^2} \quad (7)$$

d – діаметр частинки, м; ρ і ρ_c – густина, відповідно, частинок і середовища, кг/м^3 ; μ_c – динамічна в'язкість середовища, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Для проведення розрахунків в даній роботі:

$$d = 3 \text{ мм}; \rho = 7800 \text{ кг/м}^3; \rho_c = 1,2 \text{ кг/м}^3; \mu_c = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Критичне значення критерію Рейнольдса при якому починається псевдозрідження:

$$Re_{пз} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \cdot Ar^{0,5}} \quad (8)$$

Тоді, швидкість псевдозрідження $\omega_{пз}$, м/с, розраховують:

$$\omega_{пз} = \frac{Re_{пз} \cdot \mu_c}{d \cdot \rho_c} \quad (9)$$

В апаратах і реакторах, які працюють з псевдозрідженим шаром дисперсного матеріалу, значення робочої швидкості газу (рідини) вибирається

з діапазону між першою і другою критичними швидкостями. Якщо технологічний процес (масообміну, каталізу тощо) лімітується процесами, які протікають в самих частинках, (це буває тоді, коли частинки пористі) то швидкість газу приймають близькою до першої критичної швидкості (процес масообміну не завжди доцільно проводити в цій області), у іншому випадку - близькою до другої критичної швидкості.

Відношення робочої швидкості газу ω_0 до швидкості початку псевдозрідження називається числом псевдозрідження $K_{пз}$:

$$K_{пз} = \frac{\omega_0}{\omega_{пз}} \quad (10)$$

Число псевдозрідження характеризує інтенсивність перемішування частин і стан псевдозрідженого шару.

Для визначення значення критерію Рейнольдса $Re_{крит.2}$ у момент початку транспортування частин користуються виразом:

$$Re_{крит.2} = \frac{Ar}{18 + 0,575 \cdot Ar^{0,5}} \quad (11)$$

Значення другої критичної швидкості $\omega_{крит.2}$, при досягненні якої починається винесення матеріалу з апарату розраховують:

$$\omega_{крит.2} = \frac{Re_{крит.2} \cdot \mu_c}{d \cdot \rho_c} \quad (12)$$

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Установка для дослідження процесу псевдозрідження (рис. 3) складається з вертикальної скляної труби 1 (її внутрішній діаметр $D = 56$ мм, а висота $H = 1300$ мм); у нижній частині труби встановлена горизонтальна перфорована решітка 2, на яку насипається шар сферичних частинок 3. Повітря подається під решітку, на якій розміщений шар матеріалу, відцентровою газодувкою 4, яка приводиться в рух електродвигуном. Витрата повітря (а отже і швидкість його руху через шар частинок) регулюється кільцевим шибером 5, який встановлений на всмоктувальному патрубку газодувки. Динамічний напір вимірюється мікроманометром 7. Перепад статичного тиску в псевдозрідженому шарі вимірюється диференціальним манометром 8.

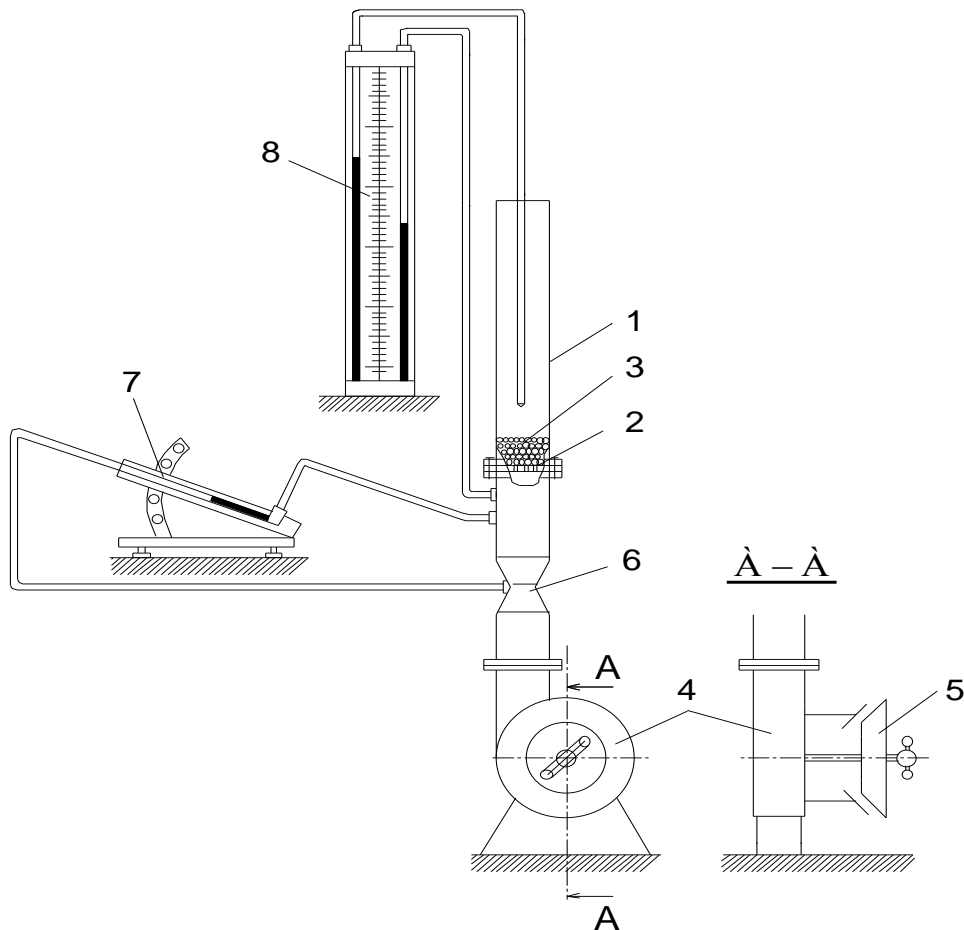


Рис. 3. Експериментальна установка для дослідження процесу псевдозрідження твердого дисперсного матеріалу

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

1. Заміряти висоту нерухомого шару частинок.
2. Повністю закрити вхідний патрубок газодувки, обертаючи руків'я (маховичок) кільцевого шиберу 5.
3. Включити двигун газодувки. Після того як він набере обертів, відкрити шибер 5 і розпочати вимірювання різниці тисків під і над шаром зернистого матеріалу за допомогою дифманометра 8, зміни динамічного напору у витратомірі Вентурі за допомогою мікроманометра 7, а також зміну висоти шару зернистого матеріалу, за допомогою лінійки прикріпленої до вертикальної скляної труби 1. Результати вимірювань заносяться у таблицю. Швидкість газу змінюється шляхом поступового відкривання кільцевого шиберу 5. Кількість точок задає викладач (рекомендується зняти не менше 7-8 точок).
4. Після закінчення експериментів повільно закрити кільцевий шибер 5.
5. Виключити двигун.

ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДІВ

1. Фіктивна швидкість газу в перерізі шару дисперсного матеріалу (в розрахунку на переріз труби 3) визначається із залежності:

$$\omega_o = \alpha \cdot \left(\frac{d_o}{D}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_M \cdot k_M \cdot (\rho_M - \rho_c)}{\rho_c}} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{d_o}{D}\right)^4} \quad (13)$$

де $\alpha = 0,854$ - коефіцієнт витрати труби Вентури;

$d_o = 0,036$ - діаметр сопла Вентури, м;

$D = 0,056$ - внутрішній діаметр труби Вентури, м;

$g = 9,81$ - прискорення земного тяжіння, м/с²;

h_M – покази мікроманометра, з'єданого з трубою Вентури, м;

k_M – коефіцієнт мікроманометра;

ρ_M – густина манометричної рідини, кг/м³; (манометр заповнений водою, отже $\rho_M = 1000$);

ρ_c – густина середовища (повітря), кг/м³. Для кімнатної температури 20^oC і середнього тиску у м. Львові можна прийняти $\rho_c = 1,2$.

Значення швидкості визначаються для кожного виміру, тому для спрощення розрахунків доцільно у формулі (17) виділити і попередньо розрахувати константу А

$$\begin{aligned} \omega_o &= \alpha \cdot \left(\frac{d_o}{D}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h_M \cdot k_M \cdot (\rho_M - \rho_c)}{\rho_c}} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{d_o}{D}\right)^4} = \\ &= \left(\alpha \cdot \left(\frac{d_o}{D}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot (\rho_M - \rho_c)}{\rho_c}} \right) \cdot \left(\sqrt{h_M \cdot k_M} \right) = A \cdot \sqrt{h_M \cdot k_M} \end{aligned}$$

2. Розрахувати значення пористості псевдозрідженого шару (для вимірних висот) користуючись залежністю (6).

3. На основі експериментальних значень перепаду тисків у псевдозрідженому шарі і обчислених значень фіктивної швидкості повітря, побудувати графік залежності $\Delta P = f(\omega_o)$ та $H = f(\omega_o)$.

4. З графіку залежності $\Delta P=f(\omega_0)$, знайти експериментальне значення швидкості псевдозрідження.

5. Розрахувати теоретичне значення швидкості псевдозрідження.

Для цього обчислити значення числа Архімеда згідно залежності (7). Використовуючи одержане значення числа Архімеда, розрахувати число Рейнольда (залежність (8)), яке відповідає початку псевдозрідження, а потім – значення швидкості псевдозрідження за формулою (9).

6. Розрахувати число псевдозрідження $K_{пз}$ згідно залежності (10) (для робочих швидкостей газу, що перевищують швидкість псевдозрідження).

7. Визначити значення критерію Рейнольдса $Re_{крит.2}$ у момент початку транспортування частин згідно залежності (11), після чого розрахувати значення другої критичної швидкості $\omega_{крит.2}$ використовуючи залежність (12).

ЗМІСТ ЗВІТУ

Звіт повинен вміщувати:

1. Методику проведення роботи.
2. Схему установки та її опис.
3. Необхідні розрахунки і заповнену таблицю.
4. Графічні залежності $\Delta P = f(\omega_0)$, $H = f(\omega_0)$.
5. Висновки із порівняння експериментальних та дослідних даних.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте характеристику станам шару дисперсного матеріалу, що мають місце при різних швидкостях руху газу або рідини при пропусканні останніх знизу вверх.

2. Які властивості має псевдозріджений шар дисперсного матеріалу? Чому його називають псевдозрідженим?

3. Поясніть графічну залежність перепаду тисків у шарі зернистого матеріалу від швидкості газу.

4. Яку швидкість називають швидкістю псевдозрідження? Як теоретично та експериментально визначається значення швидкості псевдозрідження?

Експериментальні дані та результати розрахунків

ПАРАМЕТР	№ ДОСЛІДУ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Втрати напору Δh , мм. вод. ст.								
Перепад тисків ΔP , Па								
Покази мікроманометра h_m , м								
Коефіцієнт мікроманом. k_m , м								
Фіктивна швидк. газу, ω_o , м/с								
Висота шару зерн. матеріалу, Н, м								
Пористість шару ε , м ³ /м ³								
Ar								
$Re_{пз}$								
Швидкість псевдозр. $\omega_{пз}$, м/с, визначена експериментально								
Швидкість псевдозр. $\omega_{пз}$, м/с, визначена теоретично								
Число псевдозрідження, $K_{пз}$								
$Re_{крит.2}$								
Друга критична швидкість, $\omega_{крит.2}$, м/с								

ЛІТЕРАТУРА

1. А.Г. Касаткин. Основные процессы и аппараты химической технологии.- М.: Химия, 1971. - 784 с.
2. К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии.- М.: Химия, 1967. - 664 с.
3. Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. Основы техники псевдооживления. - М.:Химия, 1967. - 650 с.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПСЕВДОЗРІДЖЕННЯ
ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №3
з курсу "Процеси і апарати хімічної технології"
для студентів хіміко-технологічних спеціальностей

Укладачі

Атаманюк Володимир Михайлович
Кіндзера Діана Петрівна
Ковальчук Олександр Васильович

Редактор

Комп'ютерне верстання