

УДК 66.045

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ОХП,

д.т.н., проф.

\_\_\_\_\_ Архипов О.Г.

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської роботи на тему

**Дослідження стійкості режиму роботи апарата з  
псевдозрідженим шаром в умовах високих температур з  
розробкою конструкції апарата**

Науковий керівник \_\_\_\_\_ доц. Москалик В.М. \_\_\_\_\_

Студент групи \_\_\_\_\_ Прибильський Є.О. \_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему  
Дослідження стійкості режиму роботи апарата з псевдозрідженим шаром в умовах високих температур з розробкою конструкції апарата  
(Назва теми)

Листів – 76, ілюстрацій – 29, таблиць – 3, посилань – 37.

Напрямок дипломної роботи обрана задача створення такого газорозподільного пристрою для апаратів з псевдозрідженим шаром, в якому забезпечується рівномірне псевдозрідження.

Рівномірне псевдозрідження досягається завдяки тому, що новий газорозподільний пристрій містить верхню газорозподільну решітку, розташовану над шаром гранульованого матеріалу, розміщеним на нижній газорозподільній решітці, де гранульований матеріал секціонований перегородками.

Об'єкт дослідження – газорозподільний пристрій.

Метою дипломної роботи є дослідження гідравлічного опору псевдозрідженого шару.

Експериментальне дослідження проводили за допомогою вимірювання гідравлічного опору псевдозрідженого шару при змінному куті відхилення колонки від вертикальної осі. У нижню частину колонки подавали повітря в кількості 2,8 м<sup>3</sup>/год, достатнім для проведення процесу псевдозрідження. Основними приладами для проведення експериментальних досліджень служили ротаметр і диференційний манометр. Повітря нагнітали поршневим компресором. Кут нахилу колонки вимірювали за допомогою транспортира.

Практична значимість отриманих результатів для хімічної та суміжних галузей промисловості полягає у створенні газорозподільного пристрою для апаратів з псевдозрідженим шаром, що має здібність автоматично компенсувати неоднорідну локальну порозність псевдозрідженого шару або/і відхилення газорозподільної решітки від горизонтальності і забезпечити рівномірне псевдозрідження.

Новизна роботи – вперше експериментально отримані залежності гідравлічного опору шару псевдозрідження від кута нахилу колонки.

(Текст реферату)

Псевдозрідження, газорозподільний пристрій, порозність шару, застійні зони, гідравлічний опір, псевдозріджуючий агент

(Ключові слова)

## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	4
Вступ.....	6
1 Аналітичний огляд .....	9
1.1 Гідродинаміка псевдозрідженого шару.....	9
1.2 Опір, порізність та висота псевдозрідженого шару.....	18
1.3 Залежність порізності зернистого шару від швидкості потоку .....	25
1.4 Робочі швидкості псевдозрідженого шару та їхній розрахунок .....	26
1.5 Розрахунок діаметра частинок, що виносяться потоком .....	30
1.6 Різновиди деяких процесів у псевдозрідженому шарі .....	31
1.7 Будова та принцип роботи апаратів із псевдозрідженим шаром .....	33
1.8 Основні вузли апаратів з псевдозрідженим шаром .....	41
2 Новий апарат з псевдозрідженим шаром за патентом України №59981 .....	49
3 Експериментальне дослідження .....	57
3.1 Опис схеми експериментальної установки .....	57
3.2 Методи, прибори та вимірювальна техніка і пристрої.....	59
3.3 Результати експериментальних досліджень .....	66
4 Обговорення результатів досліджень.....	68
Висновки.....	71
Перелік посилань .....	72
Додаток Апарат з псевдозрідженим шаром. Вид загальний.....	75

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $Ar$  – критерій Архімеда для частинок, псевдозріджених газом;  
 $d_c$  – діаметр часинки, м;  
 $d_e$  – еквівалентний діаметр каналів і проміжків між частинками зернистого шару, м;  
 $d_i$  – середній діаметр зерен  $i$ -ї монофракції, м;  
 $D$  – діаметр апарату, м;  
 $D_{ек}$  – діаметр елементарної комірки, м;  
 $h$  – висота стовпа робочої рідини, м;  
 $h_o$  – висота нерухомого зернистого шару, м;  
 $h_i$  – висота псевдозрідженого шару зерен, м;  
 $F_T$  – сила тяжіння – загальна вага всіх частинок у шарі;  
 $f$  – площа живого перетину решітки, м<sup>2</sup>;  
 $g$  – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с<sup>2</sup>;  
 $k$  – коефіцієнт розширення;  
 $Lu$  – критерій Ляценка;  
 $m_i$  – масова частка  $i$ -ї фракції;  
 $N$  – кількість частинок у зернистому шарі;  
 $n$  – кількість фракцій;  
 $P_{атм}$  – атмосферний тиск, Па;  
 $P_{абс}$  – вимірюваний тиск, Па;  
 $p_{над}$  – надлишковий вимірюваний тиск, Па;  
 $\Delta P$  – гідравлічний опір, що чинить зернистий шар течії потоку середовища, Па;  
 $\Delta P_I$  – пік тиску – момент переходу шару в псевдозріджений стан, Па; критерій Рейнольдса;  
 $Re$  – площа поперечного перерізу апарата, м<sup>2</sup>;  
 $S_a$  – щільність зрошення, м/год;  
 $U$  – об'єм вільний середовища у зернистому шарі, м<sup>3</sup>;  
 $V_v$  – об'єм зернистого шару, м<sup>3</sup>;  
 $V_{ш}$  – об'єм твердих частинок, м<sup>3</sup>;  
 $V_{ч}$  – повний об'єм нерухомого зернистого шару в апараті, м<sup>3</sup>;  
 $V_{ни}$  – об'єм елементарної комірки, м<sup>3</sup>;  
 $V_{ек}$  – середня, віднесена до повного поперечного перерізу апарата –  
 $w$  – фіктивна – швидкість течії середовища в апараті, м/с;  
 $w_i$  – поточна (фіктивна) швидкість руху потоку середовища, м/с;  
 $w_{0,кр}$  – швидкість початку псевдозрідження, м/с;  
 $w_{1кр}$  – перша критична швидкість, м/с;  
 $w_{2кр}$  – друга критична швидкість (винесення частинок із псевдозрідженого шару), м/с;  
 $w_{вит}$  – швидкість витання (вільного падіння) елемента насадки, м/с;  
 $w_{ф}$  – швидкість руху середовища, м/с;

- $z$  – показник, чисельна величина якого залежить від режиму обтікання та форми зерен, а також від фізико-хімічних властивостей взаємодіючих фаз;
- $\delta$  – питома поверхня шару монодисперсних зерен,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;
- $\delta_c$  – питома поверхня сферичних зерен;
- $\delta_{nc}$  – питома поверхня несферичних зерен;
- $\varphi$  – коефіцієнт форми зерен;
- $\gamma$  – об'ємна частка твердої фази;
- $\varepsilon$  – середня порізність псевдозрідженого шару;
- $\varepsilon_o$  – порізність нерухомого зернистого шару;
- $\varepsilon_i$  – порізність псевдозрідженого шару;
- $\lambda$  – коефіцієнт, що залежить від режиму течії потоку;
- $\mu$  – в'язкість середовища,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;
- $\rho$  – щільність,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- $\rho_n$  – щільність насипна,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- $\rho_T$  – істина щільність частинок,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- $\rho_p$  – щільність робочого середовища,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- $\rho_{атм}$  – щільність оточуючої атмосфери,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
- $\Phi$  – комплекс, що враховує форму і щільність укладення частинок у зернистому шарі.

## ВСТУП

Апарати з псевдозрідженим шаром широко застосовують в техніці для проведення реакційних, теплообмінних, масообмінних, а також механічних процесів.

Для гарантійної роботи такого апарата необхідна розподільна решітка, що забезпечить рівний потік зріджувального газу (рідини) в об'ємі псевдозріджувального шару. Тому дослідники при розробці апарата з псевдозрідженим шаром уділяють особливу увагу саме конструкції розподільної решітки.

Недоліками існуючих газорозподільних пристроїв є утворення застійних зон зернистого матеріалу, що призводить до нерівномірного розподілу по об'єму шару потоку зріджувального агента і відповідно до зниження ефективності процесу. Крім того, може бути порушена горизонтальність газорозподільних решіток при їх локальному перегріві і жолобленні внаслідок температурного перепаду.

Таким чином, задача створення такого газорозподільного пристрою для апаратів з псевдозрідженим шаром, в якому забезпечується рівномірне псевдозрідження, є **актуальною**, що і вирішило напрямок дипломної роботи.

В дипломній роботі запропоновано використання нового газорозподільного пристрою за патентом України №59981, що містить верхню газорозподільну решітку, розташовану над шаром гранульованого матеріалу, розміщеним на нижній газорозподільній решітці, де гранульований матеріал секціонований перегородками.

**Метою** дипломної роботи є дослідження рівномірності псевдозрідження, а саме експериментальне дослідження гідравлічного опору псевдозрідженого шару при змінному куті відхилення колонки від вертикальної осі.

Для досягнення мети поставлені наступні **задачі**:

– провести літературний огляд основних положень гідродинаміки псевдозрідженого шару, основних характеристик зернистого шару, методів розрахунку робочих швидкостей псевдозрідження, а також розглянути різновиди процесів у псевдозрідженому шарі, ознайомитись з будовою та принципів роботи апаратів з псевдозрідженим шаром, а також з їх основними конструктивними вузлами;

– розглянути існуючі газорозподільні пристрої, їх переваги та недоліки та визначити напрям вдосконалення їх конструкції;

– розробити схему лабораторної установки, а також методику проведення експерименту і обробки експериментальних даних для визначення гідравлічного опору псевдозрідженого шару;

– одержати експериментальні залежності гідравлічного опору від кута нахилу експериментальної колонки з метою узагальнення результатів експериментів і порівняти їх з літературними джерелами.

**Методи дослідження.** Аналіз сталої роботи апарату з псевдозрідженим шаром проводили на спеціально розробленій експериментальній установці на кафедрі машинознавства та обладнання промислових підприємств.

Основним апаратом дослідження була скляна колонка 5 внутрішнім діаметром 57 мм, оснащена поворотним механізмом. Гідравлічний опір псевдозрідженого шару в колонці при різних кутах нахилу вимірювали диференціальним манометром.

Статистичну обробку експериментальних даних вели за допомогою персонального комп'ютера.

**Об'єкт дослідження** – газорозподільний пристрій.

**Предмет дослідження** – гідравлічний опір псевдозрідженого шару.

**Практична значимість отриманих результатів** для хімічній на суміжних галузях промисловості полягає у створенні газорозподільного пристрою для апаратів з псевдозрідженим шаром, що має здібність автоматично компенсувати неоднорідну локальну порозність псевдозрідженого шару або/і відхилення газорозподільної решітки від горизонтальності і забезпечити рівномірне псевдозрідження. Результати представляють інтерес для інженерів-конструкторів науково-дослідних та проектних організацій.

**Новизна роботи** – вперше експериментально отримані залежності гідравлічного опору шару псевдозрідження від кута нахилу колонки. Визначена задовільна компенсація незадовільного розподілу потоку на вході в апарат секціонуванням гранульованого шару.

**Публікації.** За темою дипломної роботи одержано патент України № 59981, а також результати роботи доповідались на всеукраїнській науково-практичній конференції «Майбутній науковець - 2018».

Структура та обсяг дипломної роботи. Дипломна робота складається з реферату, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дипломної роботи становить 76 сторінок, з них 29 рисунків за текстом, 3 таблиці, списку використаних джерел з 37 найменувань на 3 сторінках.



## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Гідродинаміка псевдозрідженого шару

Утворення псевдозрідженого шару можна, в найпростішому випадку, уявити собі таким чином (рисунок 1.1). В вертикальній посудину 1 довільної (наприклад, циліндричної) форми, що забезпечена поперечним газопроникним підтримуючим пристроєм 2 у вигляді сітки, пористої перегородки тощо, поміщений шар дрібнозернистого твердого матеріалу 3. При подачі через пристрій 2 (так звану розподільну решітку), знизу вгору потоку газу (або рідини) з малою швидкістю шар залишається нерухомим. Якщо поступово збільшувати швидкість газу до величини, при якій вага зернистого матеріалу в шарі врівноважується силою гідродинамічного тиску висхідного потоку, тверді частинки виявляться в гідродинамічній рівновазі і отримають можливість взаємного контролю пульсації переміщення, тобто шар 3 стане «текучим» і буде мати також деякі інші властивості крапельної рідини. З подальшим збільшенням швидкості газу шар розширюється, інтенсивність руху частинок зростає, але без порушення гідродинамічної рівноваги. Нарешті, після досягнення швидкості газу, при якій сили гідродинамічного тиску стають більше сили тяжіння, частки виносяться з шару [1].

Ефективність апаратів з псевдозрідженою насадкою багато в чому визначається гідромеханічними процесами, що протікають в них [2].

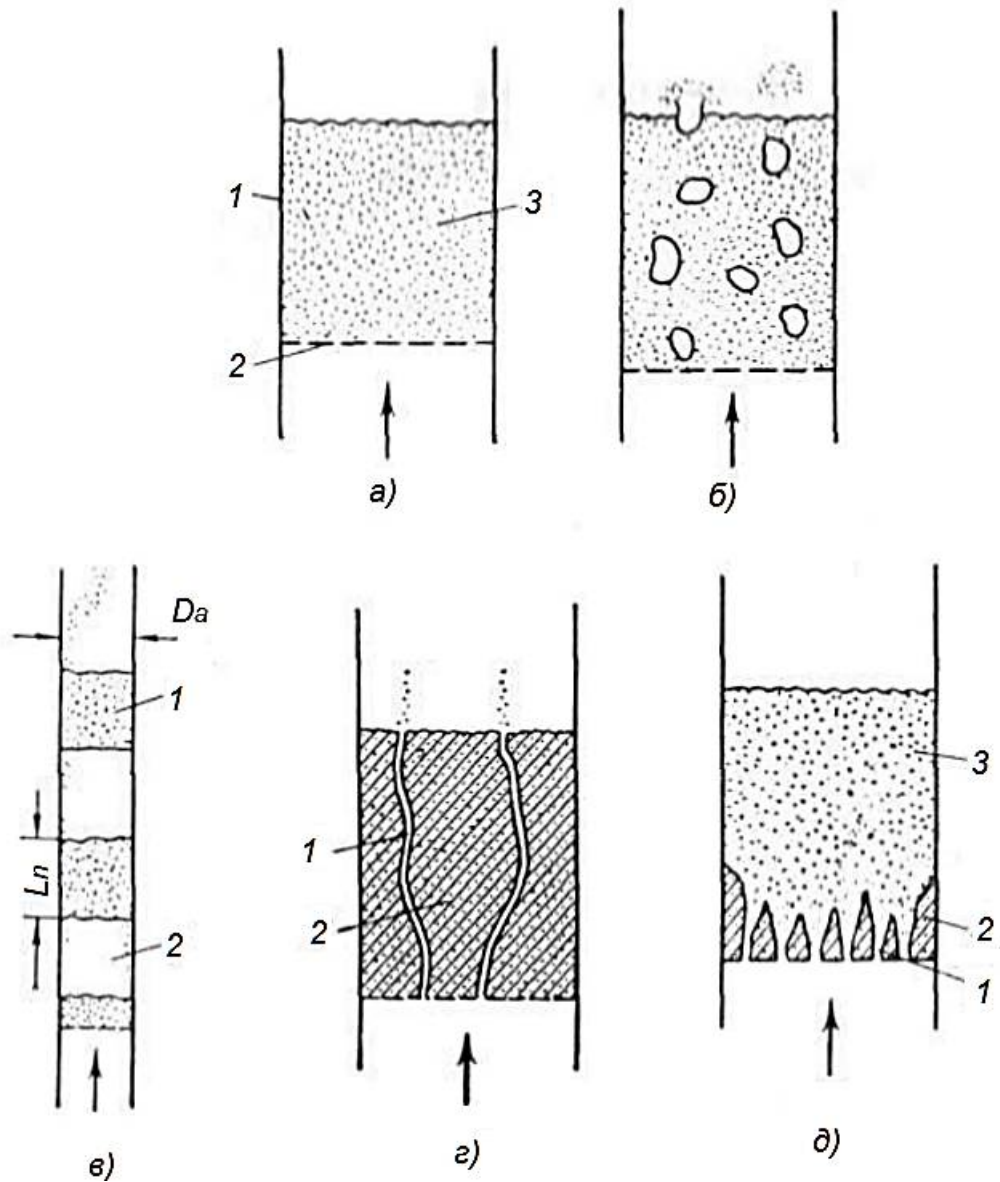


Рисунок 1.1 – Схеми псевдозріджених систем:

- а – схема апарату: 1 – корпус; 2 – розподільний пристрій; 3 – псевдозріджений шар (стрілкою показано потік зріджуючого агенту);
- б – шар з барботуванням газових бульбашок (схема процесу);
- в – шар з поршнеутворенням ( $L_n$  – висота поршня): 1 – «поршень» твердого матеріалу; 2 – «пробка» газу;
- г – шар з утворенням наскрізних каналів: 1 – канал; 2 – нерухома (малорухома) зона твердого матеріалу;
- д – шар з частковим каналоутворенням: 1 – канал; 2 – нерухома зона; 3 – псевдозріджений матеріал.

У таких апаратах відбувається протитечійний рух рідини і газу через шар твердої псевдозрідженої насадки, що супроводжується утворенням динамічного трифазного шару. Елементи насадки, які хаотично рухаються в робочій зоні абсорбера безперервно змінюють локальні швидкості газу і рідини, що ускладнює аналітичний підхід і виявлення справжніх режимів руху і законів опору [3].

Для пояснення **механізму** поведінки псевдозрідженого зрошувального шару насадки запропоновано розглядати [4] процес в шарі як барботаж високої інтенсивності, що викликається турбулізацією і дробленням рідини насадочними тілами. В іншій роботі [3] механізм поведінки шару при розвиненому псевдозрідженні розглядається як двофазний шар, в якому суцільне газове середовище обтікає зважені елементи насадки з рідинної оболонкою.

Розвиток теорії зважених систем вимагає накопичення дослідних даних в широкому інтервалі зміни параметрів, що впливають на процес, тому отримані різними дослідниками закономірності з гідродинаміки процесів, що протікають в абсорберах з псевдозрідженою насадкою, мають емпіричний або напівемпіричний характер. Проте наявні результати досліджень абсорберів з псевдозрідженою насадкою дозволяють отримувати в повному обсязі дані для проектування, оптимізації та управління абсорберами з псевдозрідженою насадкою [6].

Як наголошується в ряді робіт [6], інтервали зміни параметрів роботи абсорберів з псевдозрідженою насадкою набагато перевищують інтервали параметрів роботи абсорберів інших типів.

Області роботи абсорберів з псевдозрідженою насадкою показані на графіку  $U = f(w)$  – рис. 1.2. Трифазний зважений шар може існувати в області, обмеженої кривими 1 і 2. Точки перетину кривих 1 і 2 з горизонтальною віссю відповідають швидкості початку псевдозрідження незрошуваної насадки  $w_{0,кр}$  і швидкості витання (вільного падіння) елемента

насадки  $w_{вит}$ . Робочою областю для реальних абсорберів може служити площа, обмежена лінією 3-4-5-6.

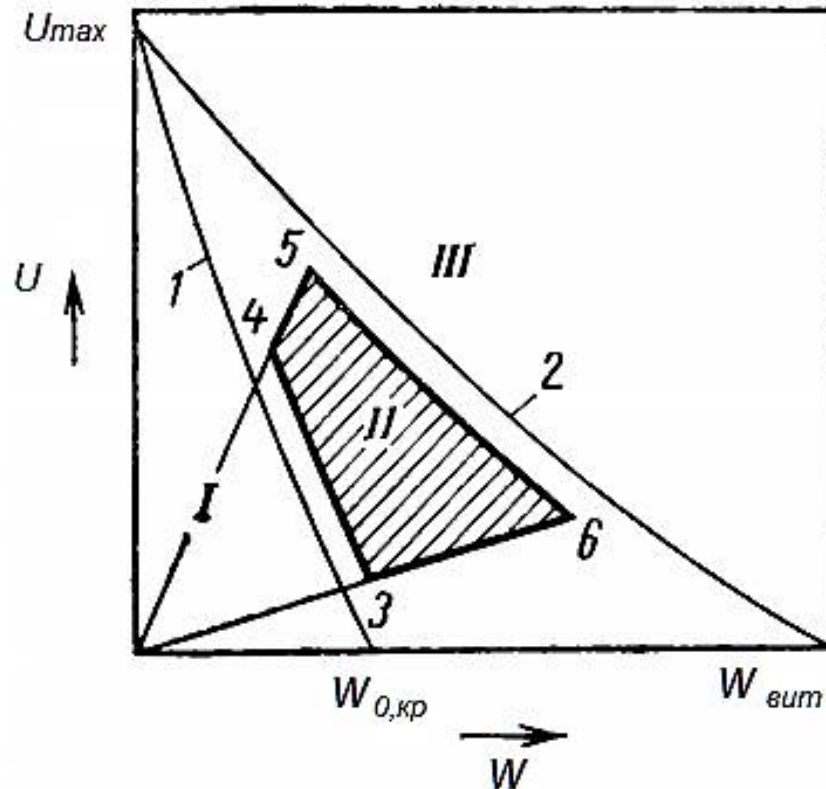


Рисунок 1.2 – Области роботи апарату з псевдозрідженим шаром:  
 I – нерухома насадка; II – робоча область апарату з псевдозрідженим шаром;  
 III – захлинання (винос насадки); 1 – залежність швидкості початку псевдозрідження від щільності зрошення; 2 – залежність швидкості захлинання (виносу насадки) від щільності зрошення; 3-4 – межа розвиненого псевдозрідження насадки; 5-6 – верхня межа робочого режиму роботи АПН без значного бризгоуносу і захлинання; 3-6 і 4-5 – лінії постійного відношення витрати рідини і газу, що забезпечує змочуваність псевдозрідженого шару і рівномірний розподіл газу по перетину апарату з псевдозрідженим шаром відповідно

Численні дані з гідродинаміки розглянуто в послідовності, що дозволяє отримати кількісні залежності, показані на рисунку 1.3 для різних випадків реалізації трифазного псевдозрідженого шару.

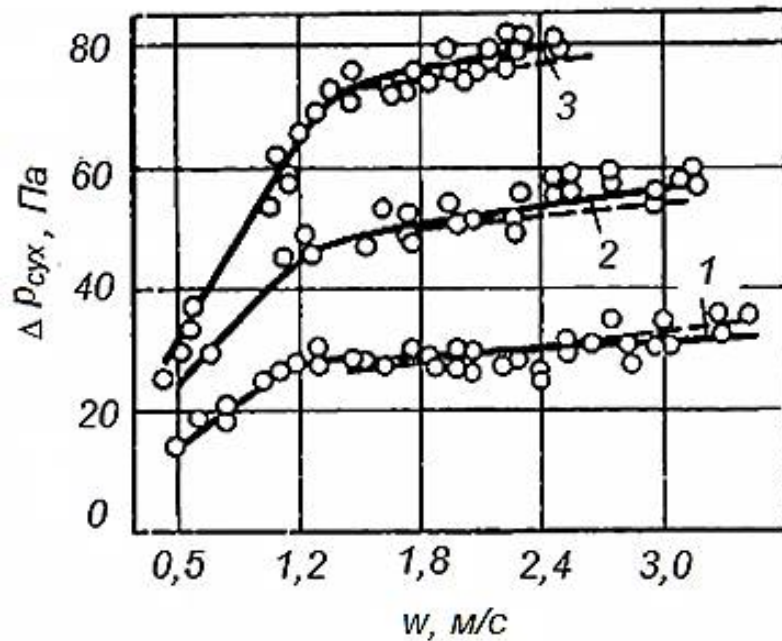


Рисунок 1.3 – Порівняння розрахункових (штрихові лінії) і експериментальних (суцільні лінії) значень гідравлічного опору сухого апарату ( $D = 200$  мм; опорно-розподільна решітка дірчаста; насадка – порожнисті поліетиленові кульки  $d_{ш} = 3.5$  мм;  $\rho_{ш} = 214$  кг/м<sup>3</sup>);  
 1 –  $h_0 = 200$  мм, маса насадки 0,74 кг; 2 –  $h_0 = 400$  мм, маса насадки 1,43 кг; 3 –  $h_0 = 600$  мм, маса насадки 2,18 кг

Поведінка псевдозрідженої незрошеної насадки підпорядковується закономірностям звичайного двухфазного псевдозрідження [7].

На рисунку 1.4 наведена залежність гідравлічного опору псевдозрідженої кульової насадки під час відсутності зрошення, від швидкості газу  $w$  і висоти статичного шару насадки  $h_0$  [8].

Аналіз залежності гідравлічного опору зрошеної псевдозрідженої насадки від швидкості газу, а також візуальні спостереження показують існування декількох гідродинамічних режимів роботи [3].

Характеристики, зовнішній вигляд і властивості зернистого шару в таких процесах залежать від напрямку руху середовища (висхідний або низхідний потік), агрегатного стану і властивостей взаємодіючих фаз, швидкості потоку, віднесеної до вільного поперечного перерізу апарата.

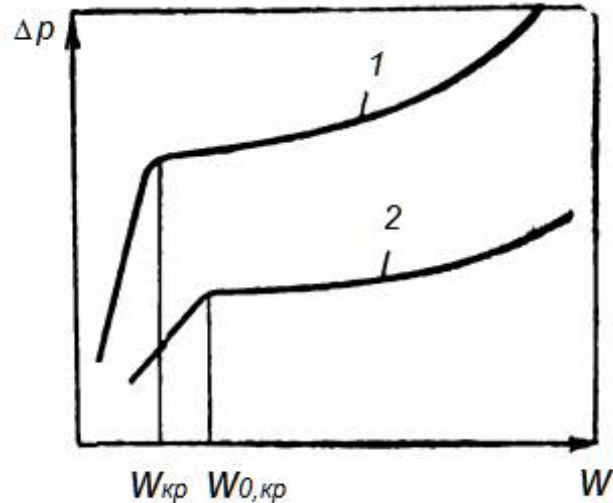


Рисунок 1.4 – Вплив зрошення насадки на гідравлічний опір н швидкість початку псевдозрідження:

1 – залежність гідравлічного опору псевдозрідженого сухого шару від швидкості газу; 2 – те ж, для зрошеного шару

При низхідній течії потік рухається у міжзернових каналах нерухомого зернистого шару у режимі фільтрування, при висхідній течії стан зернистого шару частинок залежить від швидкості руху середовища.

Звичайно *при малих швидкостях висхідної течії середовища* через зернистий шар останній залишається нерухомим, бо при цьому газ або рідина рухаються усередині каналів і проміжків між частинками. Ця течія проходить, як правило, у ламінарному режимі, властивому процесу фільтрування.

Таким чином, першою стадією висхідної течії потоку через нерухомий зернистий шар є *течія в режимі фільтрації*.

*При збільшенні швидкості потоку вище від деякого критичного значення* зернистий шар починає розширюватися, бо зі збільшенням витрати середовища вже є недостатньою площа вільного перерізу потоку, збільшується також сила тертя в міжзернових каналах, тому відбувається плавне збільшення об'єму і висоти шару, відповідно збільшується і

порізність шару. Швидкість течії потоку, за якої зернистий шар починає змінювати свої характеристики, називається **першою критичною швидкістю псевдозрідження** або *швидкістю початку переходу зерен в псевдозріджений стан* [9].

На рисунку 1.5 показано різний стан зернистого шару твердих частинок у залежності від швидкості руху висхідного потоку середовища.

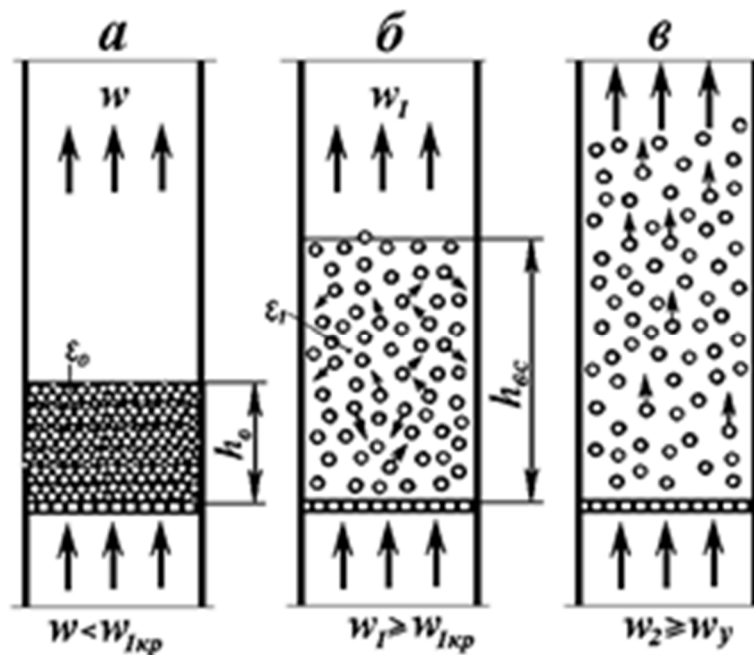


Рисунок 1.5 – Різний стан зернистого шару при взаємодії з середовищем:

а – вільно засипаний нерухомий шар; б – псевдозріджений – завислий стан з фіксованим верхнім рівнем; в – завислий стан в режимі винесення – пневмотранспорту

При швидкостях течії потоку середовища більших за першу критичну зернистий шар переходить в завислий (псевдозріджений) стан, що характеризується особливими властивостями, причому останні залежать від форми і величини зерен, від фізико-хімічних властивостей середовища, що проходить через зернистий шар. У технічній літературі для характеристики стану завислого зернистого шару використовують декілька назв, а саме: киплячий шар, псевдозріджений шар, змулений шар, бо саме такі назви

певною мірою відображають фізичну суть стану і поведінки зернистого шару в різних умовах проведення процесів [10].

У тонкому прошарку при псевдозрідженні зерен вузького гранулометричного складу газ рівномірно проходить через газорозподільну решітку і товщу шару, тому поверхня шару подібна до поверхні киплячої рідини, саме за це такий стан зернистого шару часто називають **киплячим**.

У високих псевдозріджених шарах дрібнодисперсних частинок газовий потік проривається через шар окремими пухирцями або окремими струмками, такий стан отримав назву *барботажного* або **поршневого псевдозрідження**.

У зернистому шарі, складеному із зерен вузького гранулометричного складу та переведеному в завислий стан рідиною, частинки на дуже коротких відстанях роз'єднуються між собою тонкими прошарками рідини в усьому об'ємі, шар розширюється рівномірно, і тому такий стан отримав назву **однорідного псевдозрідження**, найбільш подібного до завислого шару з чітко визначеною поверхнею розділення зернистого шару з середовищем. Однорідний псевдозріджений шар (ПШ) характеризується майже постійною концентрацією твердих частинок у всіх точках об'єму апарата (за сталої витрати середовища) незалежно від розмірів циліндричного апарата і часу.

Швидкість потоку середовища, за якої у псевдозрідженому шарі виникає явище масового винесення частинок середньої величини, називається **другою критичною швидкістю псевдозрідження** або *швидкістю винесення частинок*. В такому режимі елементи насадки залишають шар та притискаються до обмежуючої решітки [11].

До основних переваг псевдозрідженого стану системи відносять:

- її особливі властивості, подібні до властивостей рідини – індивідуальна густина, текучість, в'язкість, теплоємність, теплопровідність та ін.;



- можливість використання у процесі частинок різних розмірів (від 50 мкм до декількох мм) різної фізичної природи та різної густини і щільності;
- інтенсивне перемішування взаємодіючих фаз в об'ємі зернистого шару;
- циркуляція та класифікація частинок в шарі залежно від величини частинок, їх густини, а також від властивостей середовища;
- високорозвинена поверхня контакту фаз (так звана рівнодоступність поверхні зерен до середовища);
- високі інтенсивності міжфазового тепло- і масообміну;
- відносна простота будови апаратів з псевдозрідженим шаром, можливість їхньої автоматизації і автоматизованого управління.

Ці переваги псевдозрідженого зернистого шару широко використовуються в промисловості як прогресивний технологічний засіб, що забезпечує високоінтенсивне безперервне протікання різних процесів в умовах активної гідродинамічної взаємодії фаз, вирівнювання полів температур і концентрацій.

Метод псевдозрідженого шару широко використовують в хімічній та багатьох інших галузях промисловості при розчиненні та кристалізації солей, висушуванні різних речовин, вологих мінеральних руд і кам'яного вугілля, при адсорбції газів і пари летких розчинників, при випалюванні руд кольорових металів, при спалюванні низькокалорійного твердого палива, при каталітичному окислюванні продуктів нафто- та органічного синтезу та багатьох ін.

Псевдозрідженому шару властиві також і недоліки, серед яких найбільш вагомими є стирання частинок та пилоутворення, підвищений ерозійний знос стінок обладнання, утворення статичних зарядів електрики, що може призвести до вибухонебезпечних ситуацій та ін. [1].

## 1.2 Опір, порізність та висота псевдозрідженого шару

**Опір**, що чинить нерухомий зернистий шар руху середовища, може бути знайдений за рівнянням, подібним до формули опору течії в каналах складної форми:

$$\Delta p = \lambda \frac{h_0}{d_e} \cdot \frac{\rho_c w^2}{2} \quad (1.1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт опору для ламінарного режиму  $\lambda = (133/Re_c) - (220/Re_c)$ ;  
 $d_e = 4 \varepsilon_0 / \delta$ .

Підставлянням у формулу (1.1) усіх названих змінних отримана залежність опору в'язкісного тертя при течії рідини через нерухомий зернистий шар монодисперсних частинок, що відома як формула Козені – Кармана:

$$\Delta p = 150 \frac{\mu w h_0}{d_c^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^2} \varphi^2 = A \frac{\mu w h_0}{d_c^2} \cdot \Phi \quad (1.2)$$

де  $\varphi = \delta_{nc} / \delta_c$ .

З рівняння (1.2) випливає, що опір середовища, що рухається, через нерухомий зернистий шар залежить прямо пропорційно від в'язкості середовища, швидкості течії потоку і висоти шару та обернено пропорційно квадрату діаметра зерен. Опір зернистого шару збільшується лінійно відносно швидкості руху потоку доти, поки залишаються незмінними його об'єм, висота і порізність.

Важливими характеристиками зернистого нерухомого шару є порізність та об'ємна частка твердої фази в одиниці об'єму [12].

**Порізність**, що характеризує об'ємну частку середовища в зернистому шарі, пов'язана з іншими властивостями взаємодіючих фаз залежностями

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_{uv}} = \frac{V_{uv} - V_c}{V_{uv}} = 1 - \frac{V_c}{V_{uv}} = 1 - \frac{\rho_n}{\rho_m} \quad (1.3)$$

Для нерухомого зернистого шару порізність  $\varepsilon_o = 0,36\text{--}0,44$ , а концентрація твердої фази – її об'ємна частка ( $\gamma$ ) – залишається порівняно високою і дорівнює

$$\gamma = 1 - \varepsilon_o = 0,64\text{--}0,56.$$

При цьому режим течії та обтікання частинок потоком середовища є ламінарним навіть для газових середовищ, переважний вплив у зернистому шарі при цьому мають масові і виштовахувальні сили фаз та в'язкісні сили тертя.

При переході зернистого шару в завислий стан зі збільшенням швидкості руху середовища зростають порізність і висота шару, при цьому знижується об'ємна концентрація твердої фази, збільшується відстань між окремими частинками, посилюється вплив на шар гідродинаміки потоку.

У режимі розвинутого псевдозрідження при порізностях  $0,6 < \varepsilon < 0,80$  зернистий шар характеризується найбільшою гідродинамічною активністю взаємодіючих дисперсної і суцільної фаз, при цьому на частинки впливають не тільки масові і в'язкісні, але й інерційні сили потоку.

Режим обтікання частинок діаметром 1 – 2 мм потоком рідини в багатьох випадках стає перехідним і характеризується діапазоном чисел Архімеда  $36 < Ar < 10^5$ , а для частинок величиною більше ніж 3 мм навіть турбулентним.

У режимі розвинутого псевдозрідження поверхня завислих частинок стає рівнодоступною для потоку середовища, що значною мірою сприяє протіканню процесів тепло- та масообміну з високою інтенсивністю.

При порізностях  $0,80 < \varepsilon < 0,9$  псевдозріджений шар стає достатньо розрідженим, тобто характеризується відносно малою об'ємною часткою твердої фази в потоці, у ньому спостерігаються висхідні і спадні потоки твердих частинок і, таким чином, виникає достатньо розвинена циркуляція частинок в об'ємі шару. При порізностях  $\varepsilon > 0,9$  з псевдозрідженого шару починають виноситися потоком середовища частинки менших розмірів,

тобто в шарі починає розвиватися *режим винесення частинок* за межі робочого об'єму апарата.

Умовою переходу шару твердих частинок у псевдозріджений стан є рівність піднімальної сили потоку силам тяжіння – ваги частинок:

$$P_n = \Delta p_{nuu} \cdot S_a = F_\tau \quad (1.4)$$

Якщо середовищем, що псевдозріджує зернистий шар, є газ, то можна не враховувати вплив виштовхувальних (архімедових) сил середовища, а враховувати тільки сили тяжіння частинок, при цьому

$$F_\tau = V_v \cdot \rho_\tau \cdot g.$$

Оскільки порізність являє собою відношення об'єму порожнин і каналів у зернистому шарі до повного його об'єму, то для нерухомого шару із рівняння (1.3) можна визначити об'єм власне частинок твердої фази

$$V_v = V_{nuu}(1 - \varepsilon_0),$$

$$V_v = N \cdot \pi \cdot d_v^3 \cdot \rho_\tau / 6$$

Підставивши в рівняння (1.4) вищенаведені залежності, отримали формулу

$$\Delta p_{nuu} \cdot S_a = V_v \cdot \rho_\tau \cdot g = V_{nuu}(1 - \varepsilon_0) \rho_m \cdot g \quad (1.5)$$

з якої, для випадку псевдозрідження частинок газовою фазою і для циліндричних апаратів (постійного поперечного перетину), випливає

$$\Delta p_{nuu} = (1 - \varepsilon_0) \rho_m \cdot h_o \cdot g \quad (1.6)$$

Однією з найважливіших властивостей псевдозрідженого шару є та, що його опір силам внутрішнього тертя при течії середовища в міжзернових каналах залишається сталим у всьому діапазоні робочих швидкостей потоку середовища від першої до другої критичної (рисунок 1.6), що підтверджується формулою (1.6) і експериментально.

Якщо середовищем, що псевдозріджує зернистий шар, є рідина і при цьому впливом виштовхувальних сил зневажати не можна, на основі наведених рівнянь отримали

$$\Delta p_{nuu} = (\rho_m - \rho_c)(1 - \varepsilon_0) h_o \cdot g \quad (1.7)$$

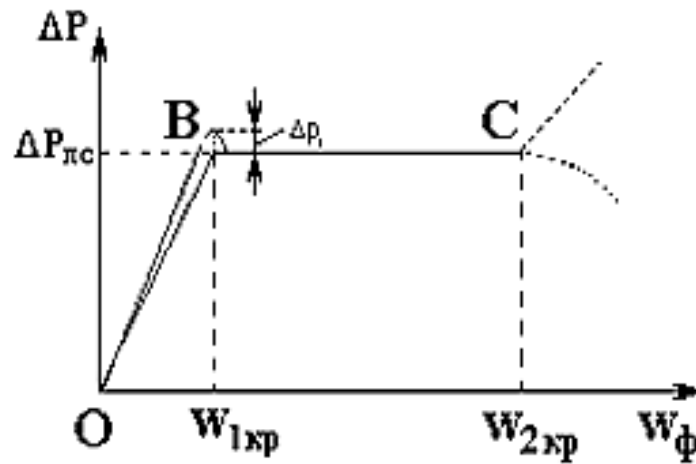


Рисунок 1.6 – Зміни втрат тиску ( $\Delta P$ ) у нерухомому і псевдозрідженому шарі залежно від швидкості руху середовища  $w_\phi$

Формули (1.6) та (1.7) є подібними до основного рівняння гідростатики і свідчать про аналогію між рідиною і псевдозрідженим зернистим шаром.

Використовуючи цю основну властивість, можна записати тотожність для трьох різних станів псевдозрідженого шару

$$\Delta p_{nu} = \rho_m(1 - \varepsilon_o) \cdot h_o \cdot hg = \rho_m(1 - \varepsilon_l) \cdot h_l = \rho_m(1 - \varepsilon_i) h_i \cdot g \quad (1.8)$$

з якої випливає залежність:

$$h_o(1 - \varepsilon_o) = h_i(1 - \varepsilon_i) \quad (1.9)$$

Залежність (1.9) дозволяє визначити поточну порізність псевдозрідженого зернистого шару в робочих умовах, вимірюючи в дослідах висоту нерухомого і псевдозрідженого шару, при цьому

$$\varepsilon_i = 1 - (1 - \varepsilon_o)h_o / h_i \quad (1.10)$$

або за відомими значеннями порізностей завислого шару для двох його різних станів розрахувати висоту однорідного псевдозрідженого шару

$$h_i = \frac{(1 - \varepsilon_o)}{(1 - \varepsilon_i)} h_o \quad (1.11)$$

Звичайно залежності (1.10) і (1.11) залишаються справедливими для монодисперсних частинок округлої форми.

Серед багатьох фізичних моделей гідродинамічної взаємодії фаз у однорідному псевдозрідженому шарі відома стохастична модель “елементарних комірок”, відповідно до якої увесь об’єм однорідного псевдозрідженого шару розглядають як суму елементарних комірок, у центрі яких знаходиться тверда частинка, оточена прошарком рухомого середовища – рідини. В результаті висхідного руху середовища у зернистому шарі на частинки діють такі сили: масові (гравітаційні), виштовхувальні (архімедові) та інерційні сили, а також сили тертя (в’язкісні) з середовищем та сили зіткнення, під впливом яких частинка коливається і переміщується в об’ємі комірки. Всі енергетичні впливи на частинку і середовище через рідинний прошарок передаються іншим частинкам, у результаті чого в зернистому шарі відбуваються перерозподіл впливаючих сил, локальні пульсації частинок, їхнє переміщення, зміни порізності шару та ін.

Отже, в об’ємі псевдозрідженого шару відбуваються безперервні локальні флуктуації параметрів потоків, і в той же час в циліндричному апараті середня швидкість руху середовища та середня порізність шару залишаються незмінними [13].

Маса рідини, що оточує частинку і захоплюється нею при русі, називається **приєднаною масою**, і вона безпосередньо поєднана з розмірами частинки і порізністю псевдозрідженого шару.

Для “елементарної комірки”, в об’ємі якої знаходиться одна частинка сферичної форми, відповідно до поняття про порізність шару запишемо

$$\varepsilon = \frac{V_{ек} - V_ч}{V_{ек}} = 1 - \frac{V_ч}{V_{ек}} = 1 - \frac{(\pi / 6)d_ч^3}{(\pi / 6)D_{ек}^3} \quad (1.12)$$

Розв’язуючи залежність (1.12) щодо відношення діаметрів елементарної комірки і твердої частинки, знайшли

$$\frac{D_{ек}}{d_ч} = 1/(1 - \varepsilon)^{0,333} \quad (1.13)$$

Еквівалентний діаметр міжзернових каналів у зернистому шарі визначають за залежністю

$$d_e = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon d_u}{(1-\varepsilon)},$$

яку можна подати у вигляді відношення

$$\frac{d_e}{d_u} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \quad (1.14)$$

На основі залежностей (1.13) і (1.14) побудовані графіки, подані на рисунку 1.7.

Із рис. 1.7 видно, що еквівалентний діаметр міжзернових каналів (крива 2) досить швидко зростає залежно від порізності шару.

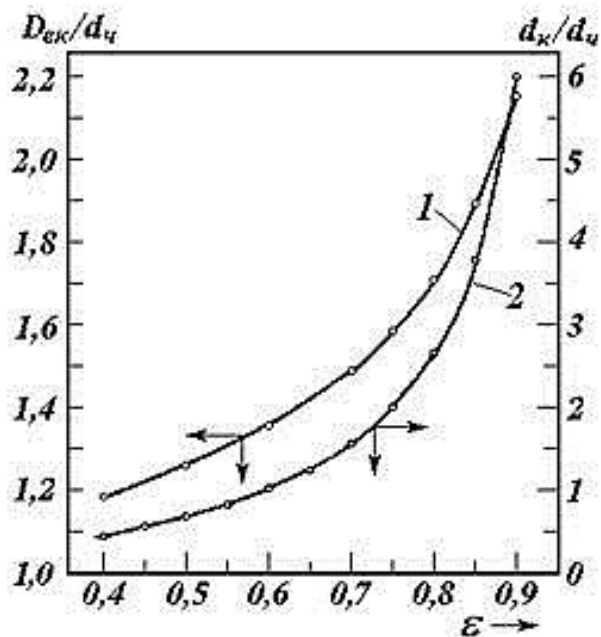


Рисунок 1.7 – Залежність відношень діаметра елементарної комірки до діаметра частинок (1) і еквівалентного діаметра міжзернових каналів до діаметра частинок (2) від порізності псевдозрідженого шару (ε)

Так, вже при порізностях шару  $\varepsilon > 0,6$  еквівалентний діаметр міжзернових каналів перевищує діаметр частинок, при порізностях шару  $\varepsilon > 0,75$  еквівалентний діаметр міжзернових каналів перевищує діаметр частинок більше ніж у 2 рази. Зауважимо, що еквівалентний діаметр елементарної

комірки (крива 1) зростає менш помітно (при порізностях шару  $\varepsilon = 0,6$  відношення  $(D_{ек}/d_u) \approx 1,356$ , а при при порізностях шару  $\varepsilon = 0,8$  відношення  $(D_{ек}/d_u) \approx 1,71$ ).

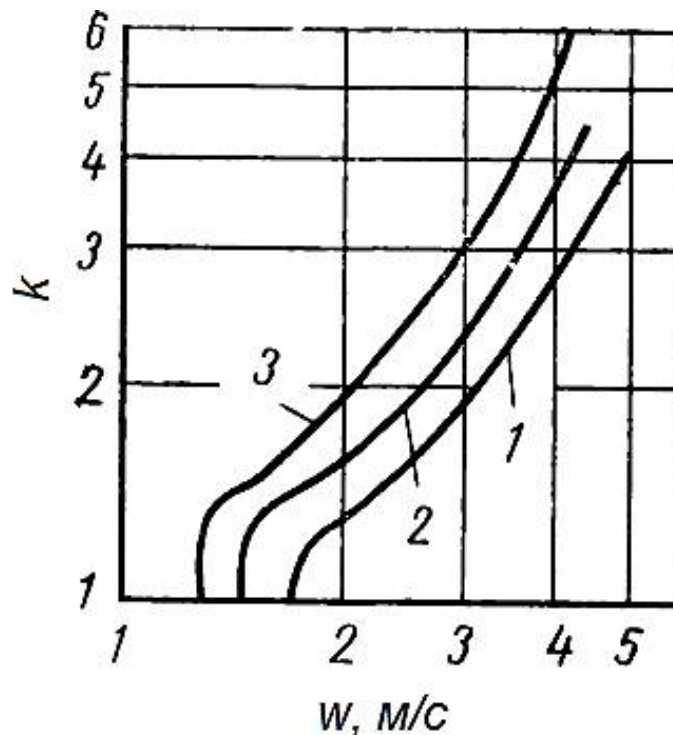
Отже, з підвищенням руху середовища й відповідно зі збільшенням порізності зернистого шару зростає вплив інерційних сил на рух частинок.

**Висота зрошуваного шару** в псевдозрідженому стані вище, ніж незрошуваних при інших рівних умовах. Це видно на рисунку 1.8 [7]. Зазвичай висота динамічного шару характеризується коефіцієнтом розширення  $k$ , який являє собою відношення висоти псевдозрідженого шару  $h_i$  до статичної висоті нерухомого шару

$$k = h_i / h_0 \quad (1.15)$$

Для незрошуваного шару псевдозрідженої кульової насадки пропонується рівняння [14]:

$$k = \frac{0,625w_{0,кр}}{w_{0,кр} - 0,375w} \quad (1.16)$$



Рисунк 1.8 – Залежність ступеня розширення псевдоожигеного шару насадки від щільності зрошення [7]:

1 –  $U = 0$ ; 2 –  $U = 10$  м/год; 3 –  $U = 20$  м/год;



Виходячи з балансу по твердій фазі в шарі:

$$k = h_i (1-\varepsilon) = h_0 (1-\varepsilon_0)$$

отримуємо вираз:

$$k = \frac{1-\varepsilon_0}{1-1,09(w/w_{sum})^{0,377}} \quad (1.17)$$

За даними роботи [14] вираз для  $k$  має аналогічний вид:

$$k = \frac{1-\varepsilon_0}{1-(w/w_{sum})^{0,42}} \quad (1.18)$$

### 1.3 Залежність порізності зернистого шару від швидкості потоку

Порізність псевдозрідженого шару перебуває у складній залежності від швидкості руху потоку середовища. Для зернистого шару із монодисперсних частинок швидкість руху потоку середовища і порізність шару в умовах однорідного псевдозрідження рідиною добре описуються залежністю

$$w_i = w_{sum} \varepsilon_i^z \quad (1.19)$$

Залежність (1.19) дозволяє на основі експериментів для зерен різних твердих матеріалів, розмірів і форми визначити швидкість вільного осідання зерен у рідкому середовищі  $w_0$  і величину показника  $z$ , замірюючи висоту псевдозрідженого шару залежно від швидкості течії потоку рідини у вільному перетині циліндричного апарата та розраховуючи за формулою (1.17) поточну порізність зернистого шару.

Рівняння (1.19) у логарифмічних координатах можна подати у вигляді прямих ліній (рисунок 1.9), кут нахилу і положення яких залежать від діаметра зерен і властивостей псевдозрідженої системи.

Зауважимо, що для дрібних частинок кут нахилу прямих більший, зі збільшенням діаметра зерен кут нахилу прямих зменшується.

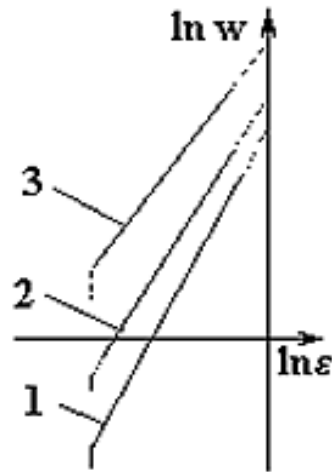


Рисунок 1.9 – Залежність пористості однорідного псевдозрідженого шару від швидкості потоку і діаметра зерен:

1 – для дрібних частинок; 2, 3 – для середніх і великих частинок відповідно

У діапазоні швидкостей від  $w_{1к}$  до  $w_{2к}$  показник  $z$  змінюється в інтервалі чисел від 4,8 до 2,40.

Для умов однорідного псевдозрідження рідиною твердих частинок в діапазоні чисел Архімеда  $36 < Ar < 10^5$  показник  $z$  із достатньою точністю можна розрахувати за залежністю [9].

$$z = 5,2 / Ar^{0,06} \quad (1.20)$$

#### 1.4 Робочі швидкості псевдозрідженого шару та їхній розрахунок

Першу критичну швидкість газового потоку, за якої зернистий шар починає переходити в псевдозріджений стан для сферичних частинок можна розрахувати, прирівнявши залежності (1.2) і (1.8)

$$\frac{150\mu w_{1к} h_o}{d_v^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon_o)^2}{\varepsilon_o^3} = \rho_c (1-\varepsilon_o) h_o g$$

та, розв'язавши їх спільно відносно  $w_{1к}$ , отримали:

$$w_{1к} = \frac{d_c^2 g \cdot \rho_c}{150\mu} \cdot \frac{\varepsilon_o}{(1-\varepsilon_o)} \quad (1.21)$$

Домноживши обидві частини рівняння (1.21) на комплекс  $d_c \rho_c / \mu$ , отримали залежність

$$\frac{w_{1к} \cdot d_c \cdot \rho_c}{\mu} = \frac{d_c^3 g \cdot \rho_c \cdot \rho_c}{\mu^2} \cdot \frac{\varepsilon_o^3}{150(1-\varepsilon_o)},$$

яку можна подати у критеріальному вигляді, при цьому одержали:

$$Re_{1к} = 0,0067 Ar \cdot \frac{\varepsilon_o^3}{(1-\varepsilon_o)} \quad (1.22)$$

де  $Ar = d_c^3 g \rho_c \rho_c / \mu^2$ .

Припустивши середню порізність нерухомого шару із сферичних частинок  $\varepsilon_o = 0,4$  і підставивши її в рівняння (1.22), отримали

$$Re_{1к} = 7,1 \cdot 10^{-4} Ar \quad (1.23)$$

Отже, для визначення *першої критичної швидкості* при псевдозрідженні твердих частинок газом можна використовувати критеріальне рівняння (1.23).

Для розрахунків робочих швидкостей руху середовища в процесах розвиненого псевдозрідження залежно від порізності шару і властивостей взаємодіючих фаз запропонована велика кількість критеріальних рівнянь вигляду  $Re = f(Ar, \varepsilon)$ , але найчастіше у вітчизняній літературі використовують критеріальне рівняння

$$Re = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}} \quad (1.24)$$

$$Re = w d_c \rho_c / \mu.$$

Рівняння (1.24) дозволяє розрахувати робочі швидкості потоку середовища у всьому діапазоні існування псевдозрідженого шару, при цьому для визначення *першої критичної швидкості* потоку у нього підставляють середню порізність нерухомого шару ( $\varepsilon_o = 0,4$ ), для визначення *другої критичної швидкості* потоку приймають  $\varepsilon_o = 1,0$ .

У діапазоні порізностей зернистого шару  $0,5 < \varepsilon < 0,75$  проходить більшість технологічних процесів, при цьому оптимальний гідродинамічний режим взаємодії фаз у псевдозрідженому шарі для мілкодисперсних частинок протікає переважно у діапазоні порізностей  $0,7 < \varepsilon < 0,75$ , для крупнодисперсних частинок – у діапазоні  $0,6 < \varepsilon < 0,65$ .

Якщо з умов процесу відомі числа Рейнольдса та Архімеда, то з формули (1.24) можна орієнтовно розрахувати порізність псевдозрідженого шару:

$$\varepsilon = (18Re + 0,36Re^2 / Ar)^{0,21} \quad (1.25)$$

З рівняння (1.24), розрахованого щодо числа Рейнольдса, знаходимо робочу швидкість руху середовища, а саме

$$w = Re \cdot \mu / d_c \cdot \rho_c \quad (1.26)$$

Якщо зернистий шар складений із полідисперсних частинок, то середній еквівалентний діаметр зерен визначають за формулою:

$$d_{ec} = \sum_1^n d_i \cdot m_i$$

Обчислений еквівалентний діаметр зерен використовується як визначальний у критеріях Архімеда та Рейнольдса.

Алгоритм розрахунку робочої швидкості псевдозрідження включає такі етапи:

- визначення параметрів системи зернистий шар – середовище для робочих умов процесу за заданої порізності зернистого шару;
- розрахунок чисел Архімеда та Рейнольдса за рівнянням (1.24);
- визначення робочої швидкості руху потоку середовища, що псевдозріджує зернистий шар, за рівнянням (1.26);
- якщо форма частинок не є сферичною, то у рівнянні (1.26) враховують коефіцієнт сферичності.

У розрахунковій практиці для визначення робочої швидкості руху потоку середовища часто використовують критерій Лященко

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{w^3 d_p^3 \rho_c^3}{\mu^3} \cdot \frac{d_p^3 g \cdot \rho_c \cdot \rho_p}{\mu^2} = \frac{w^3 \cdot \rho_c^2}{\rho_p \cdot \mu \cdot g} \quad (1.27)$$

з якого можна визначити фіктивну швидкість руху потоку середовища

$$w = \left[ Ly \cdot \rho_p \cdot \mu \cdot g / \rho_c^2 \right]^{0,33} \quad (1.28)$$

Для наближених розрахунків із похибкою, що не перевищує 20 %, рекомендовано використовувати номограму, побудовану на основі рівнянь (1.24) і (1.27) та подану на рисунку 1.10.

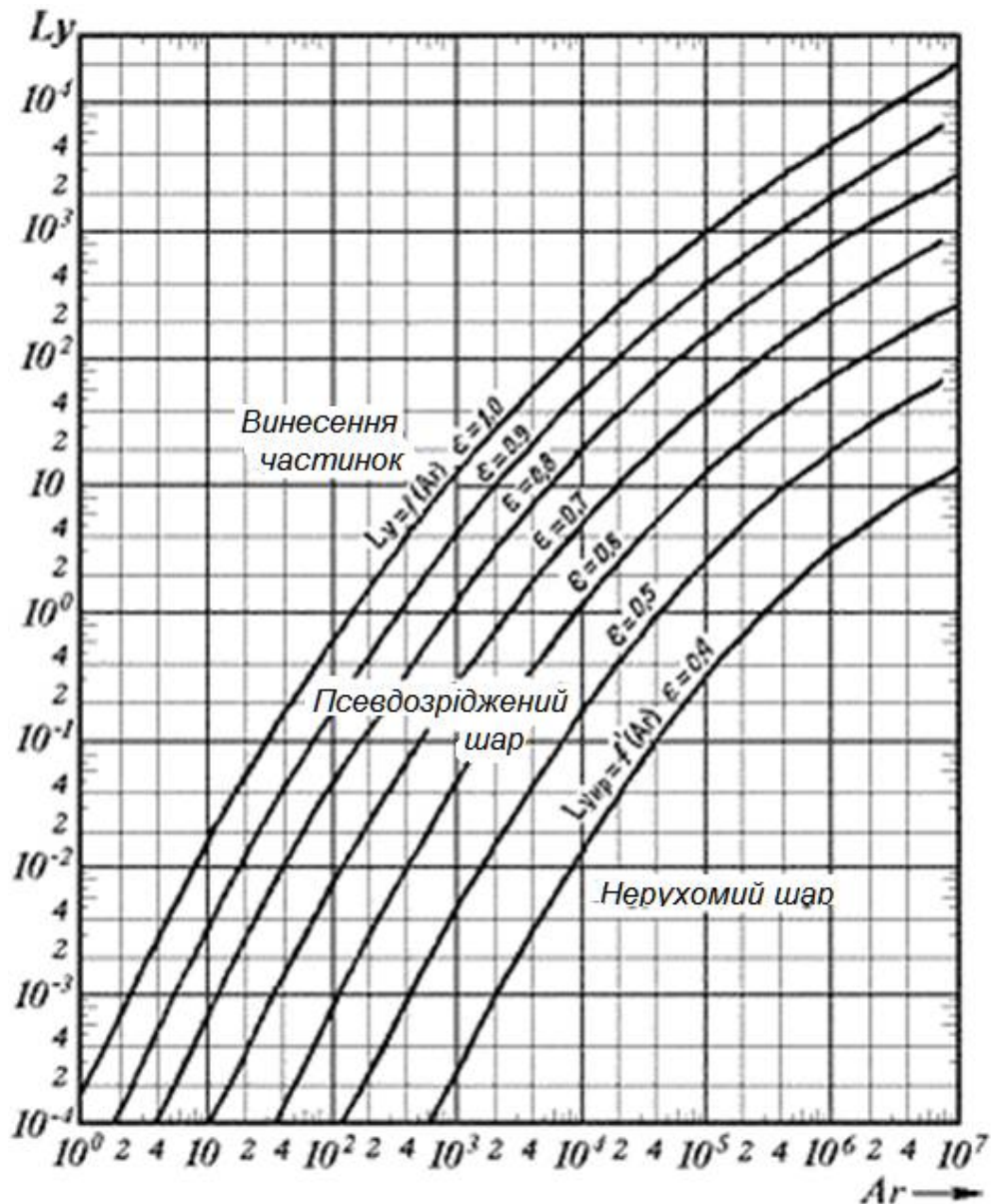


Рисунок 1.10 – Залежність критерію Ляценка ( $Ly$ ) від критерію Архімеда ( $Ar$ ) і порізності псевдозрідженого шару ( $\varepsilon$ ) зернистих частинок

За допомогою рисунку 1.10 можна визначити робочу швидкість руху потоку середовища для забезпечення бажаної (заданої) порізності псевдозрідженого шару за визначеним числом Архімеда або визначити порізність псевдозрідженого шару частинок за заданої швидкості руху потоку (за визначеним числом  $Lu$ ) та за відомої величини діаметра зерен (за визначеним числом  $Ar$ ) і, нарешті, можна визначити середній діаметр зерен, що псевдозріджені середовищем до заданої порізності псевдозрідженого шару.

У літературі та в розрахунках досить часто використовують показчик “число псевдозрідження”, під яким розуміють відношення робочої (фіктивної) швидкості середовища в апараті ( $w$ ) до першої критичної швидкості псевдозрідження ( $w_{1кр}$ ), тобто

$$k_{nc} = w / w_{1кр}.$$

Цей показчик по суті не визначає ефективність взаємодії фаз, тому більш коректним показчиком умов взаємодії фаз є порізність псевдозрідженого шару [13].

### 1.5 Розрахунок діаметра частинок, що виносяться потоком

Іноді виникає необхідність визначити діаметр зерен, винесених висхідним потоком за відомої фіктивної швидкості середовища. На основі нижчевикладеного алгоритму цю задачу розв’язують за допомогою критерію Лященко (формула (1.27)) та графіка, поданого на рисунку 1.10 [13].

1. За формулою (1.27) визначають число Лященко, при цьому звичайно треба знати швидкість потоку і властивості середовища (густину і в’язкість), а також густину (щільність) частинок, що зважені у потоці.

2. За допомогою графіка (рисунок 1.10) у точці перетину числа Лященко з лінією порізності шару  $\epsilon_y = 1,0$  визначають число Архімеда.

3. За визначеним числом Архімеда розраховують діаметр частинок, що гарантовано виносяться потоком із апарата, при цьому:

$$d_u = \sqrt[3]{Ar \cdot \mu^2 / g \cdot \rho_c (\rho_u - \rho_c)} \quad (1.29)$$

4. Якщо відомий гідродинамічний режим взаємодії фаз, то можна визначити діаметр частинок, що виносяться потоком, за спрощеним методом.

Так, для газового середовища, нехтуючи виштовхувальною силою, при ламінарному режимі обтікання зерен (коли коефіцієнт опору  $\lambda = 24/Re$  та за формулою ( $Re_o = 0,055Ar$ ), знайшли

$$d_u = 1,35(w \cdot \mu / \rho_u)^{0,5} \quad (1.30)$$

Так само, для турбулентного режиму обтікання частинок, коли  $\lambda = 0,44$  та за формулою ( $Re_o = 1,73Ar^{0,5}$ ), знайшли

$$d_u = w^2 \rho_c / 3(\rho_u - \rho_c)g \quad (1.31)$$

## 1.6 Різновиди деяких процесів у псевдозрідженому шарі

**Віброкиплячий зернистий шар.** Як зазначалось, для утворення псевдозрідженого шару потрібно під газорозподільчу решітку, на якій знаходиться зернистий шар, подавати газ зі швидкістю, що перевищує першу критичну. В такому процесі значно зростають об'ємні витрати середовища, а також енергетичні витрати. Крім того, якщо зернистий шар складається із полідисперсних частинок, то дрібні частинки переходять у зважений стан при швидкостях потоку значно менших, ніж великі частинки і, отже, в той час як великі частинки ще залишаються нерухомими, дрібні починають виноситись потоком із апарата.

Одним із позитивних напрямків створення оптимальних умов для проведення багатьох процесів є використання вібраційної техніки одночасно з використанням позитивних властивостей киплячого шару, що дозволило створити велику групу енергозберігаючого технологічного обладнання, у якому процеси проводять з використанням віброкиплячого шару.

Віброкиплячий шар у хіміко-технологічних процесах утворюється в результаті комбінованого впливу вібраційних коливань певної частоти і амплітуди, утворюваних спеціальними пристроями, з подачею газу через розподільну решітку під шар зернистого матеріалу. В цьому разі за рахунок вібраційних коливань зернистий шар відривається від решітки і набуває плинних властивостей, а газовий потік продуває шар і взаємодіє з зернистим матеріалом (охолоджує або нагріває його, висушує або окислює частинки, й ін.).

При використанні віброкиплячого шару вплив газового потоку, як псевдозріджуючого агента, перестає бути вирішальною, і отже витрата газу майже цілком визначається балансовими співвідношеннями між взаємодіючими фазами. Крім того, віброкиплячий шар можна використовувати при подачі газу зверху вниз (що неможливо в процесах з псевдозрідженим шаром), або у вакуумних установках з циркулюючим інертним газом.

**Аерофонтануючий зернистий шар.** Серед багатьох методів обробки зернистих матеріалів газовим середовищем застосовують аерофонтануючий зернистий шар, утворюваний в результаті подачі з високою швидкістю струмини газу в шар зернистого матеріалу. Звичайно швидкість струмини, що витікає через трубу (чи отвір), значно перевищує другу критичну швидкість для найбільших частинок зернистого матеріалу, в результаті чого центральна струмина газового потоку створює локальну зону, захоплює в неї зернистий матеріал і виносить його на поверхню зернистого шару у вигляді фонтана. Потім тверді частинки осипаються і рухаються униз разом із усім шаром зернистого матеріалу. Таким чином в апараті створюється рухомий зернистий шар, центральна частина якого складається з розрідженого зернистого шару, що рухається уверх у режимі винесення зерен в надшаровий простір. Периферійна зона шару рухається униз з невеликою швидкістю в режимі щільного зернистого шару і отже в апараті утворюється



циклічний рух зернистого шару з центральним розрідженим ядром – фонтаном і кільцевого ущільненого зернистого шару, що рухається униз.

Аерофонтанні процеси реалізують переважно в апаратах циліндроконічної форми, у яких нижня частина має конічну форму, а верхня – циліндричну.

Перевагами аерофонтанних процесів у першу чергу є набагато менша витрата газового середовища, можливість використання високого шару зернистого матеріалу з крупнозернистими частинками та ін.

Аерофонтанні апарати застосовують у процесах висушування розчинів на інертних зернистих частинках, а також у виробництві гранульованих мінеральних добрив та багатьох ін. [3].

### 1.7 Будова та принцип роботи апаратів із псевдозрідженим шаром

Залежно від особливостей хіміко-технологічного процесу одні і ті ж властивості псевдозрідженого шару можна трактувати і як переваги, і як недоліки. Так, винесення з шару дрібних частинок ускладнює здійснення каталітичних процесів, а при сушінні використовується для вивантаження готового продукту; при інтенсивному перемішуванні вирівнюється поле температур і усувається можливість значних локальних перегрівів, тобто досягається ізотермічності шару (що важливо, наприклад, при переробці термолабільних матеріалів), проте знижується рушійна сила процесу і зростає неоднорідність обробки твердих частинок. Стирання їх в шарі може призводити, наприклад, до збільшення витрати каталізаторів, істотних витрат на пилеочищення відпрацьованих газів; проте, при випалюванні, хлорування або сушінні, супроводжуваних обсмолені поверхні твердих частинок і стінок апаратів, стирання грає важливу роль.

Головні переваги апаратів з псевдозрідженим шаром перед застосовуваними в одних і тих же з ними хіміко-технологічних процесах

апаратами з нерухомим або рухомим шаром зернистого матеріалу і апаратами типу "обертвий барабан": простота завантаження і переміщення зріджуючого матеріалу, а також вивантаження готового продукту; можливість розміщення всередині теплообмінних, газорозподільних або пристроями, що; інтенсивність теплообміну між псевдозрідженим шаром і поверхнею конструкційних елементів; легкість герметизації навіть при високих робочих тисках тощо. Для багатьох хіміко-технологічних процесів одинична потужність агрегатів, що включають апарати з псевдозрідженим шаром, практично необмежена.

Області застосування псевдозрідженим шаром надзвичайно різноманітні. Узагальнимо їх за допомогою декількох типових схем апаратів (рисунок 1.11), кожен з яких може бути використаний для проведення групи процесів (механічний, фізичних, фізико-хімічний або хімічних), що мають подібні риси.

Псевдозрідження в проточних системах газ–тверде тіло (рисунок 1.11, а і б) часто застосовують при нагріванні і охолодженні, адсорбції, сушінні, водній дегазації полімерів, коксуванні, відновленні  $Fe_2O_3$  воднем та ін.

Зазвичай тверді частинки рухаються зверху вниз назустріч газовому потоку. Наближення структури потоків до ідеального витіснення досягається за допомогою перегородок провального типу, решіток з переточними пристроями, оформленням псевдозрідженим шаром у вигляді вертикального каскаду послідовно з'єднаних апаратів.

У подібних протитечійних системах створюються оптимальні умови взаємодії фаз. Так, при екзотермічних процесах (наприклад, при окисленні) в верхніх за ходом потоку секціях апарату з псевдозрідженим шаром здійснюється підігрів твердих частинок газами, в нижніх – нагрівання зріджуючого агенту обробленими твердими частинками; в результаті в робочій зоні вдається підтримувати високі температури без додаткового підведення теплоти.

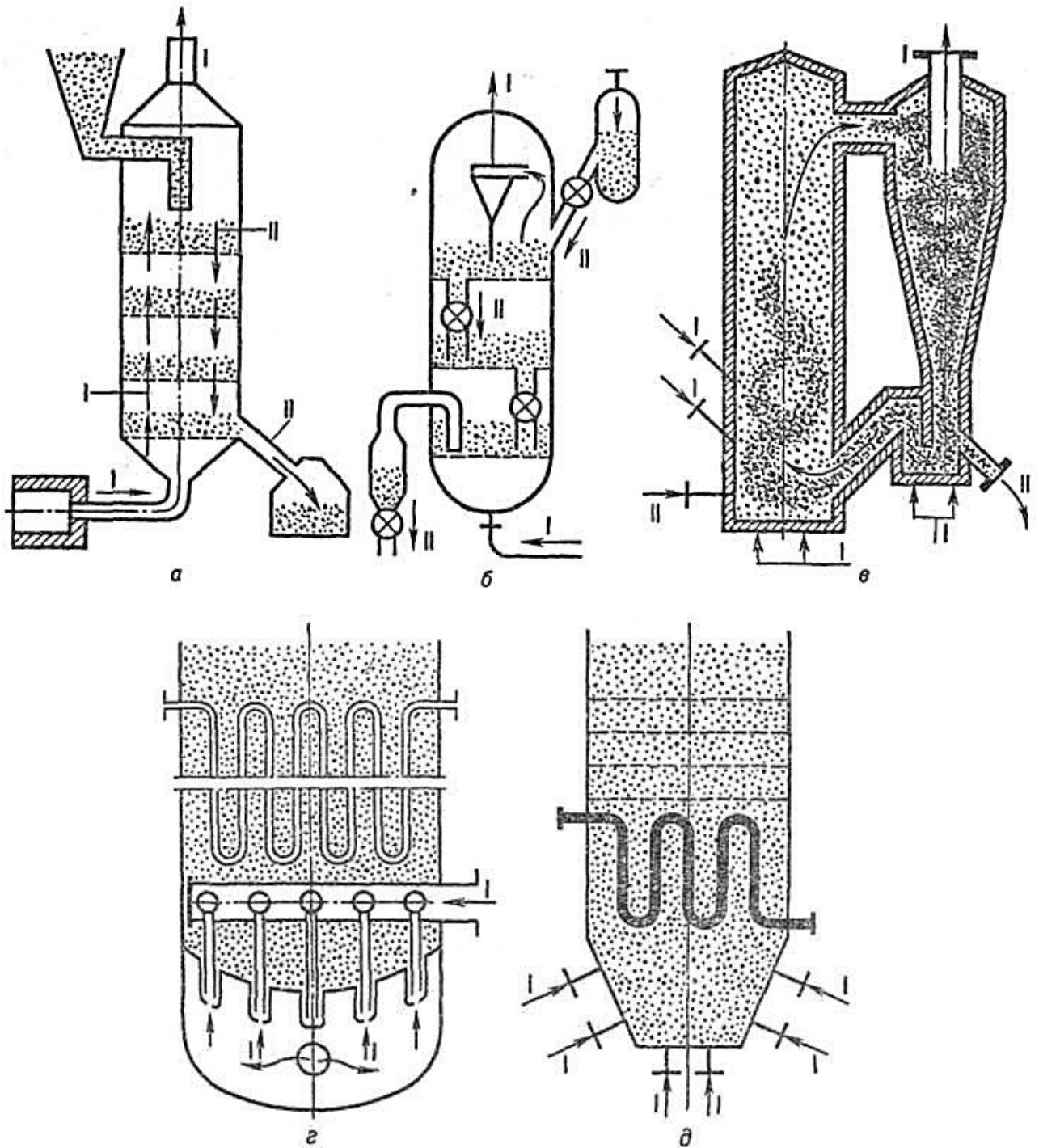


Рисунок 1.11 – Апарати з псевдозрідженим шаром:

а, б – секціоновані протиточні з решітками провальними і забезпеченими переточними пристроями (адсорбція, випал); в – прямоточний з "швидким" шаром і циркуляцією твердих частинок (випал, спалювання твердих палив); г, д – з внутрішніми теплознімаючими елементами і різними способами газорозподілу (реакторні процеси);

I – потік зріджуючого агента; II – потік частинок.

При адсорбції в нижніх секціях апарату насичені сорбуючим компонентом частки взаємодіють з газовим потоком, в якому концентрація цього компонента максимальна, в верхніх секціях збіднений їм газ контактує зі свіжими твердими частинками; таким чином забезпечується наближення до оптимально можливого ступеня вилучення цільового компонента. Внаслідок звуження в секціонованому апараті спектра розподілу часів перебування твердих частинок і зменшення інтенсивності перемішування досягається їх рівномірна обробка, що важливо в багатьох процесах (наприклад, при відновленні металів з оксидів).

Широко поширені прямоточні процеси в "швидких" псевдозріджених шарах, нерідко комбінованих зі звичайними киплячими шарами (рисунок 1.11, в). При швидкостях, які перевищують швидкості унесення, тверді частинки рухаються у вигляді газової суспензії або розріджених пакетів, перемішування газової і твердої фаз незначне, усувається опір міжфазному переносу. В результаті запобігається агломерація частинок (напр., при спалюванні вугілля або сланців), досягаються рівномірний випал коксу при термічному крекінгу і високі ступені перетворення і селективності в каталітичних процесах, знижуються енерговитрати при отриманні  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  з гідроксиду алюмінію тощо [15].

Чисельні і реакторні процеси (в тому числі каталітичні), що здійснюються в псевдозріджених шарах. Найбільш відомі окислювальне хлорування етилену до дихлоретану; окислювальний амоноліз пропілену з отриманням акрилонітрилу; синтез вінілацетату взаємодією оцтової кислоти з ацетиленом; окислення нафталіну у фталевий ангідрид і  $\text{SO}_2$  в  $\text{SO}_3$ ; отримання різних хлорсиланів взаємодією порошкоподібного Si і його сплавів з  $\text{HCl}$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$ , а також з  $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ ; пряме хлорування вуглеводнів і хлорвуглеводнів. Значні перспективи має хлорування оксидів металів з отриманням хлоридів Al, Ti, Fe, Si і ін.

При всьому різноманітті конструкцій реакторів вони являють собою апарати з вільно киплячими або секціонованими за допомогою провальних решіток шарами, які забезпечені теплообмінними елементами; останні мають газорозподільники у вигляді перфорованих плит або сопла, а також барботери (рисунок 1.11, г). Нерідко газ надходить в реактор через бокові штуцери (рисунок 1.11, д і рисунок 1.12, е) [16].

Функціонують апарати, в які одночасно вводяться газоподібні і рідкі реагенти. Способи поліпшення контактування фаз, а також впливу на перемішування в реакторах принципово ті ж, що і для систем газ–рідина в колонних апаратах. Завдяки плинності псевдозрідженого шару такі каталітичні процеси вторинної переробки нафти, як крекінг та риформінг, проводять в суміщених блоках реактор – регенератор (рисунок 1.12, ж), що дозволило перейти від напівперіодичного виробництва до безперервного. Подібні комбінації швидко поширилися і на інші реакційні і масообмінні процеси (наприклад, системи реактор – адсорбер) [17].

Псевдозріджений шар також застосовують: для отримання гранульованих продуктів шляхом введення в шар розпилених розчинів або струменів газів, що конденсуються з утворенням твердих продуктів, наприклад мінеральних добрив, льоду,  $AlCl_3$ ; для покриття захисною полімерною плівкою нагрітих деталей; для проведення кристалізації з розчинів, вилуговування (зріджуючий агент – вилуговуючий розчин), розчинення; як високотемпературний теплоносій тощо [18].

Конструкції апаратів із псевдозрідженим шаром звичайно враховують технологічні особливості процесу, що проводиться в апараті. Апарати з псевдозрідженим шаром використовують для проведення багатьох гідромеханічних процесів, таких як пневмо- і гідрокласифікація зернистих матеріалів, для нагрівання і охолодження сипких зернистих продуктів, для висушування вологих сипких речовин, для проведення процесів розчинення, кристалізації, екстрагування, адсорбції й іонообміну, випалу мінеральних

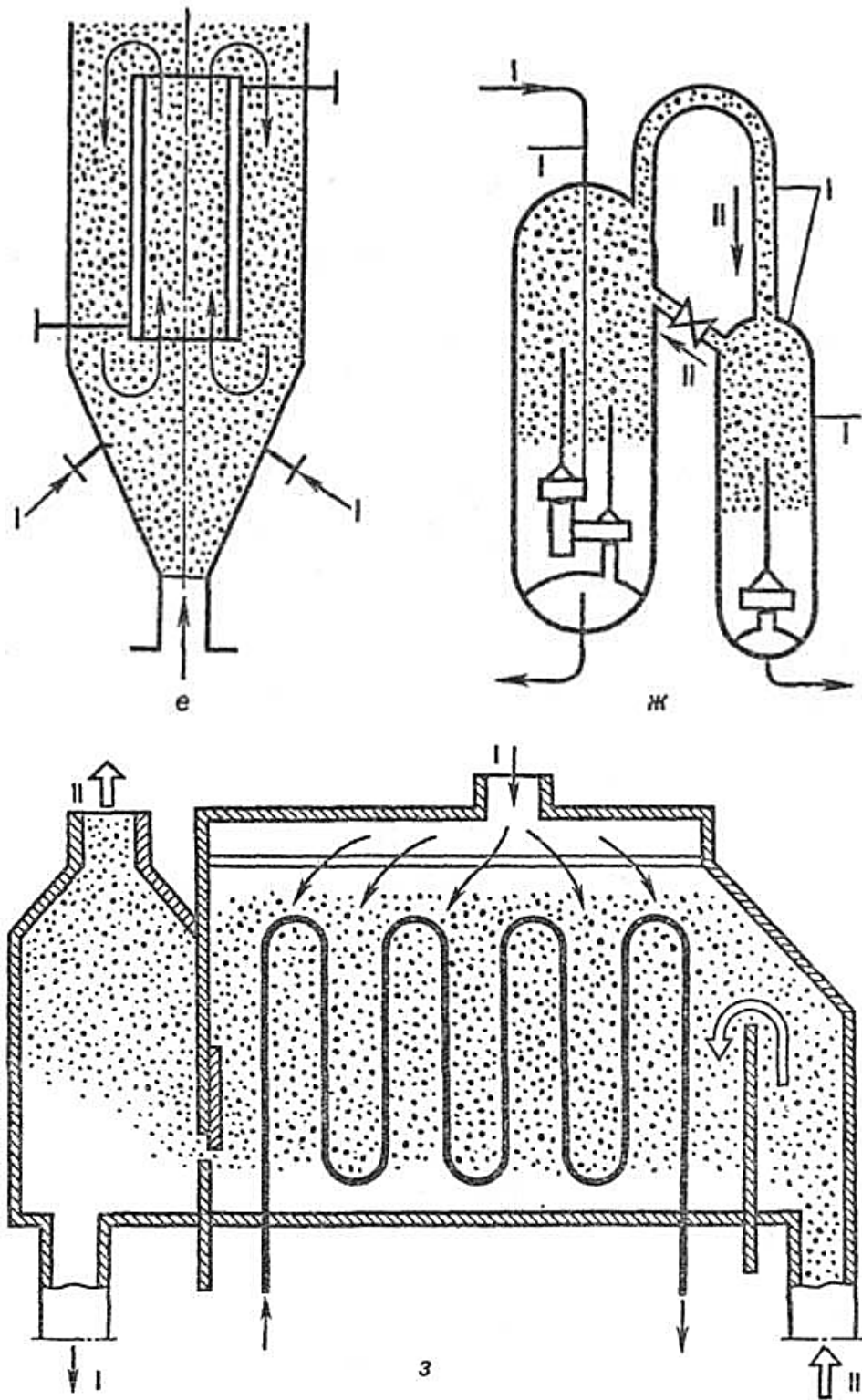


Рисунок 1.12– Апарати з псевдозрідженим шаром:

е – з внутрішнім циркуляційним контуром (десублімації, реакторні процеси); ж – блок апаратів з циркуляцією твердих частинок (крекінг, риформінг); з – з горизонтальним шаром (нагрівання, охолодження, сушка);

I – потік зріджуючого агента; II – потік частинок.

речовин і руд, спалювання подрібненого палива (наприклад, кам'яного і бурого вугілля, сланцю та ін.).

Розрізняють апарати циліндричні, циліндроконічні та із прямокутною камерою, вертикальні і горизонтальні, одно- і багатосекційні та інші.

Розглянемо один із апаратів, що містить майже всі типові пристрої для даного типу обладнання.

На рисунку 1.13 подана принципова схема устрою вертикального апарата для регенерації адсорбенту в установці каталітичного крекінгу нафтопродуктів.

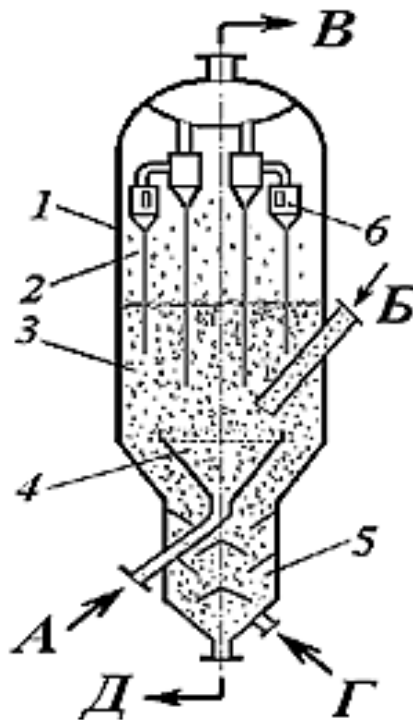


Рисунок 1.13 – Будова апарата псевдозрідженого шару для регенерації адсорбенту:

А – подача нагрітого повітря; Б – подача завуглецьованого адсорбенту; В – відведення газів; Г – підведення повітря; Д – відведення регенерованого адсорбенту;

1 – корпус; 2 – сепараційна камера; 3 – робоча секція киплячого шару; 4 – розподільна решітка; 5 – охолоджувальна секція; 6 – група циклонів – пиловловлювачів

Типовий апарат псевдозрідженого шару складається із корпусу 1, закритого кришкою та днищем, технологічних патрубків для підведення та відведення потоків, газорозподільної решітки 4.

Під кришкою апарата змонтована група циклонів – пиловловлювачів 6, до нижньої частини апарата приєднана охолоджувальна секція 5. Подача забрудненого вуглецем каталізатора в апарат здійснюється через патрубок Б, безперервне розвантаження регенованого каталізатора проводиться через патрубок Д.

Гарячий газ (повітря), що подається через патрубок А, проходить через газорозподільну решітку 4, рівномірно розподіляється по перерізу робочої секції і переводить у псевдозріджений стан зернистий, забруднений сажею каталізатор, при цьому в псевдозрідженому шарі відбувається інтенсивне вигорання сажі з поверхні зерен. Запилене повітря в надшаровому просторі очищається від пилу в циклонах – пиловловлювачах 6. Регенований каталізатор проходить через охолоджувальну секцію 5 і через патрубок Д видаляється в живильник пневмотранспортної установки.

Подібного типу установки з псевдозрідженим шаром можна використовувати для проведення процесів гранулювання і сушіння багатокомпонентних мінеральних добрив, для очищення повітря від пари летких розчинників на шарі активованого вугілля та у багатьох інших випадках, де необхідно створити високорозвинену поверхню контакту фаз і забезпечити високу інтенсивність процесів тепло- і масообміну [18].

Взагалі, галузь промисловості, де псевдозріджений шар не використовується або не може бути застосований в перспективі, назвати важко. У той же час він є однією з найбільш складних середовищ для здійснення хіміко-технологічних процесів, і перелік невдалих спроб його використання досить великий.



## 1.8 Основні вузли апаратів з псевдозрідженим шаром

Інтенсивність і стійкість процесів (тепло- і масообмінних, хімічні перетворення), що здійснюються в апаратах з псевдозрідженим шаром, визначаються не тільки фізико-хімічними умовами, а й гідродинамічною обстановкою, яка в свою чергу залежить від ряду конструктивних факторів.

Серед останніх найважливішу роль відіграють розподільники зріджуючого агенту за перетином апарату, які часто є опорними пристроями для псевдозрідженого шару. Від конструкції цих розподільників в значній мірі залежать характер і розміри каналів, що утворюються, газових бульбашок і застійних зон в псевдозрідженому шарі, а значить і якість псевдозрідження.

В апаратах з псевдозрідженим шаром застосовують різноманітні типи газорозподільних пристроїв, для правильного вибору і розрахунку яких необхідно враховувати як конструктивні особливості апарату (розміри, форма), так і технологічні характеристики процесу (температура, схильність частинок до агломерації, розмір часток, робоча швидкість газу, запиленість і забрудненість його сторонніми домішками).

За призначенням розподільні пристрої підрозділяються на чотири види:

→ власне розподільні, розташовані біля основи шару і підтримуючі його;

→ перерозподільні, що обмежують подовжню циркуляцію твердої та газової фаз і перерозподіляють газовий потік, покращуючи тим самим якість псевдозрідження;

→ підпірні пристрої, що обмежують розширення шару і сприяють збільшенню його однорідності;

→ відбійні решітки, що служать для вирівнювання поля швидкостей над вільною поверхнею шару і зниження виносу твердої фази.

За конструктивними ознаками розподільні пристрої підрозділяються на нерухомі і рухомі, провальні та безпровальні, решітчасті і безрешітчасті.

Нерухомі розподільні пристрої відрізняються відносною простотою виготовлення, монтажу та обслуговування, що і зумовило їх широке застосування. Переваги рухомих пристроїв полягають у тому, що вони забезпечують більшу, в порівнянні з нерухомими, рівномірність псевдозрідження, зводять до мінімуму, або навіть зовсім виключають, застійні зони по периферії шару і на самому розподільному пристрої, призводять до зменшення витрат енергії на дуття, так як частка живого перетину рухливих решіток може бути значно більше, ніж у нерухомих.

Для отримання задовільної якості псевдозрідження рекомендують [20] пористі плити, виготовлені з зерен, розмір яких становить не більше  $1/10$  діаметра псевдозріджених твердих частинок.

Багаточисельні паралельні дослідження пористих і перфорованих газорозподільних решіток [20, 21, 22] узгоджено свідчать про значні переваги пористих решіток, в порівнянні з іншими нерухомими газорозподільними пристроями ці решітки забезпечують більше розширення, меншу ефективну в'язкість і велику рівномірність псевдозрідженого шару.

Розподільні перфоровані решітки можна поділити на три типи (рисунки 1.14): факельні; вихрові; комбіновані.

Чим більше діаметри отворів, з якими виконується решітка, при тому ж живому перетині (тобто чим менше числом отворів), тим значніші так звані застійні зони в проміжках між отворами, вплив швидкості газового потоку на розмір застійних зон зменшується [23].

Схема розташування застійних зон приведена на рисунку 1.15. Показано, що на розмір цих зон, крім природи твердої фази і величини первинного завантаження апарату, впливають також розміри частинок і лінійна швидкість газового потоку.

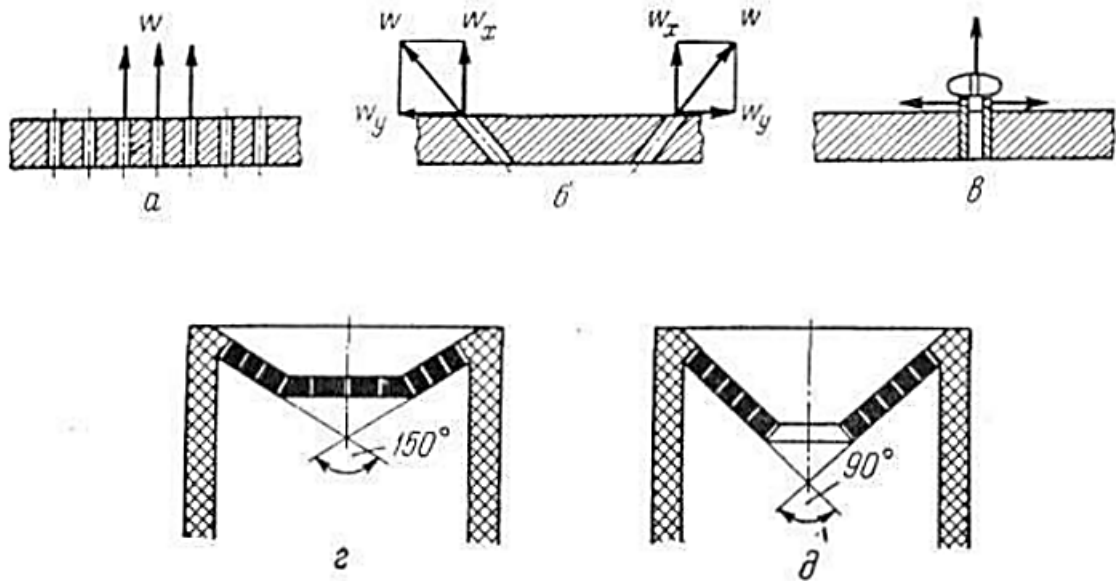


Рисунок 1.14 – Типи розподільних решіток:

а – факельна; б, г, д –вихрова; в – комбінована

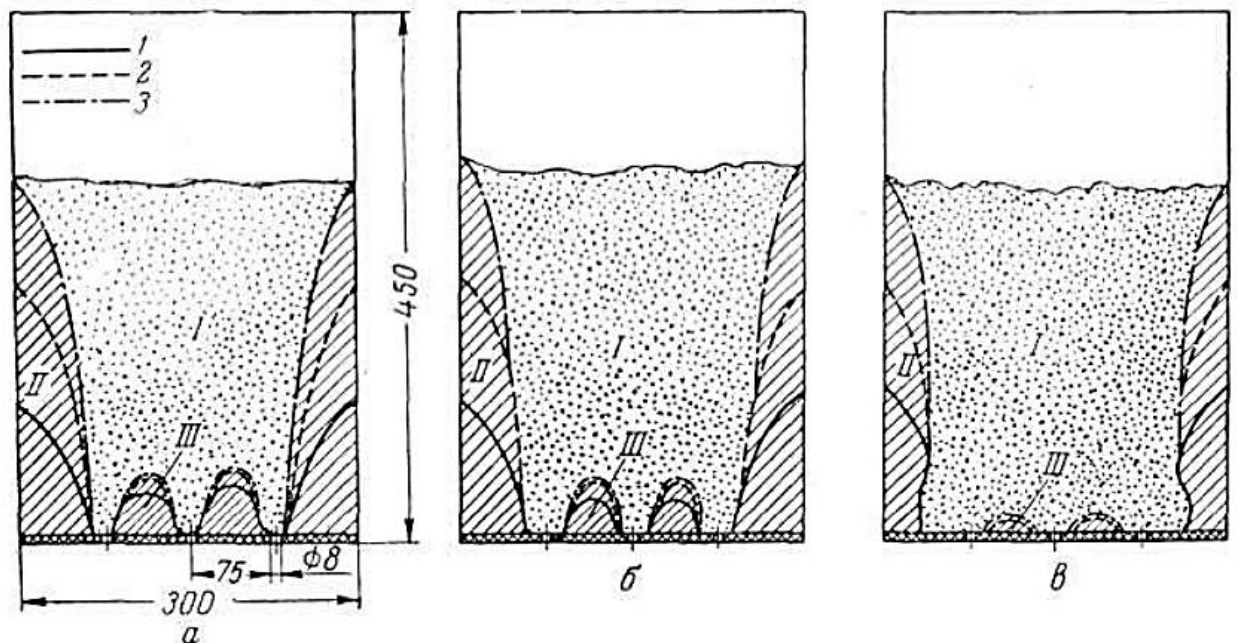


Рисунок 1.15 – Схема розташування застійних зон в апаратах з решітками факельного типу:

а – тверда фаза – кремніймідний сплав; б – пісок; в – пшоно; I – зона інтенсивного перемішування; II – застійна зона біля стінок моделі; III – застійна зона між отворами решітки; 1 – лінія, що обмежує застійні зони при висоті шару 100 мм, 2 – те ж при 200 мм, 3 – те ж при 300 мм

Для запобігання утворенню застійних зон між отворами газорозподільної решітки, а також між решіткою і обичайкою апарату було запропоновано газорозподільний пристрій в вигляді системи зв'язаних конусів і його модифікації [24] – стільникові решітки (рисунок 1.16). Їх застосовують для процесів з твердою фазою, схильної до агломерації [25]. Для зменшення пульсацій твердої фази і запобігання провалу зернистого матеріалу в вершинах конусів завадять металокерамічні пластини.

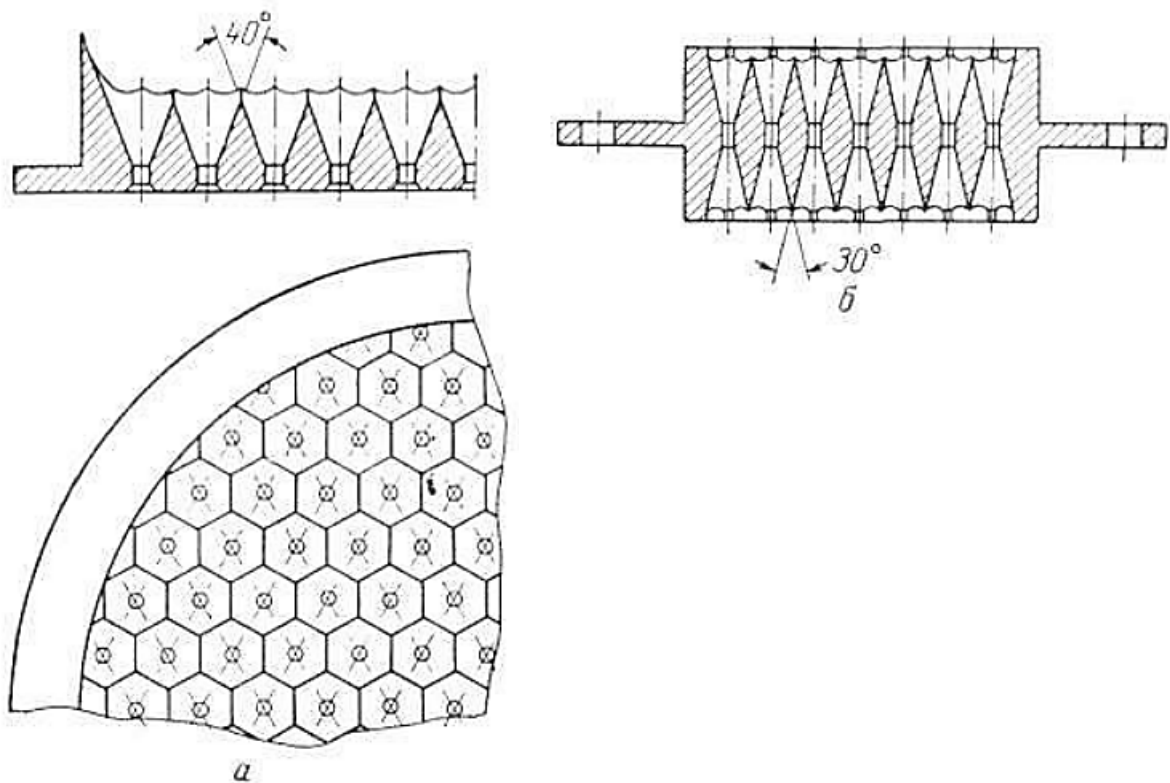


Рисунок 1.16 – Стільникові решітки:

а – одностороння; б – двостороння

Ялинкоподібні розподільвачі–«павуки» (рисунок 1.17) є менш ефективними пристроями, ніж розподільні решітки [26]. Однак ці розподільники в поєднанні з кільцевими «маточниками» становлять значний інтерес внаслідок відносної простоти конструкції.

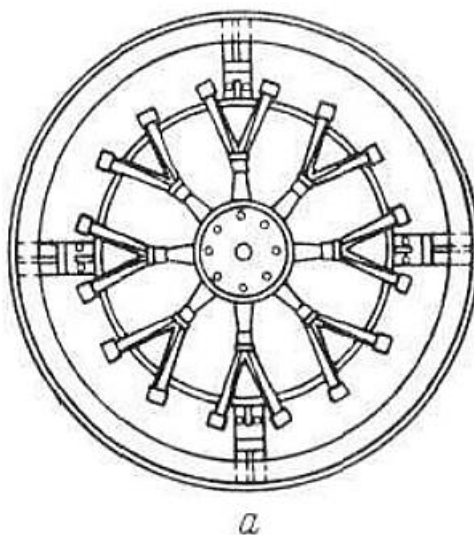


Рисунок 1.17 – Пристрої для розподілу повітря регенераторів каталітичного крекінгу:

а – розподільник типу «павук»; б – трубчастий розподільник.

Найважливішими параметрами нерухомих розподільних пристроїв є площа живого перетину і пов'язана з нею швидкість газу на виході з отворів решітки. Встановлено, що стійке псевдозрідження досягається здебільшого при малій площі живого перетину і якомога більшій кількості отворів [27, 28]. Однак ніяких кількісних закономірностей тут до сих пір не існує, а рекомендовані різними авторами площі живого перетину коливаються в широких межах: від 0,1 до 5% та більше.

Наявність застійних зон матеріалу на розподільчому пристрої або в периферійних областях шару спонукало дослідників шукати нові методи розподілу зріджуючого агенту. Крім цього, певна частина розподільчих решіток поступово виходить з ладу внаслідок забивання отворів зернистим матеріалом, пилом або через випадання па решітку великих шматків або агломератів частинок.

Всі ці особливості псевдозрідження на нерухомих решітках привели до створення вібруючих, що здійснюють поступальний або зворотно-поступальний рух, решіток, що обертаються, і безрешітчатих пристроїв, в

більшій чи меншій мірі вільних від зазначених недоліків. Решітки зі зворотно-поступальним рухом застосовані в топках з псевдозрідженим шаром [29].

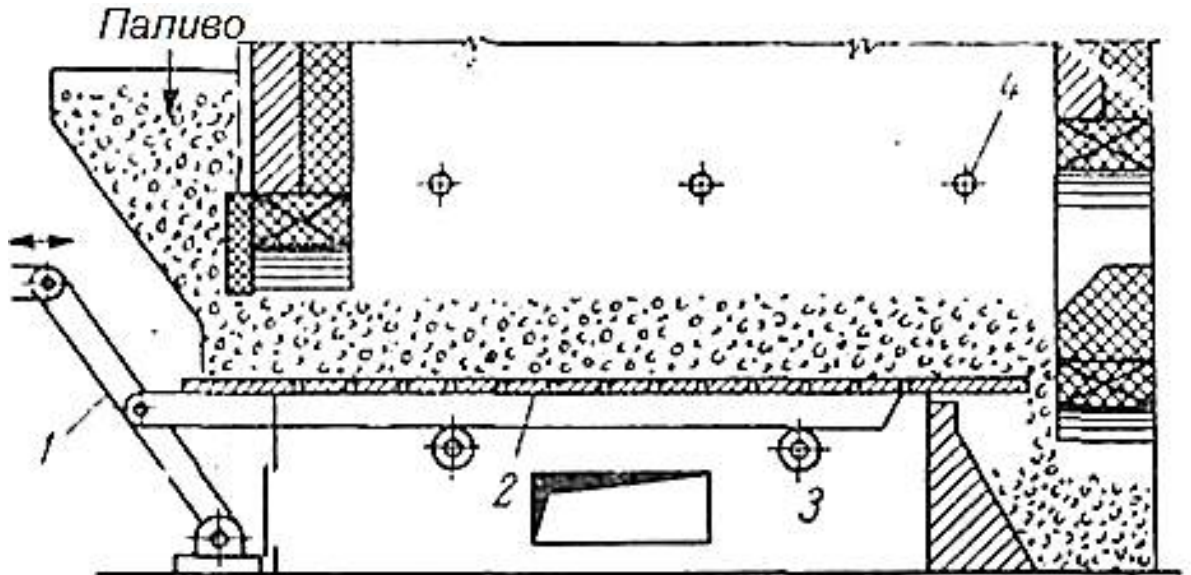


Рисунок 1.18 – Принципова схема топки з решіткою, що здійснює зворотно-поступальним рух:

1 – механізм приводу решітки; 2 – решітка; 3 – дуттєва камера; 4 – сопла для подачі вторинного повітря

Іншим рухомих газорозподільних пристроями є обертовий конус (рисунок 1.19). Переваги такого газорозподілу в апаратах малих діаметрів викликають сумнів, так як ця конструкція підсилює тенденцію прориву газу по центру, де висота шару є мінімальною.

Отже, якісні спостереження дають підстави вважати, що проблема досягнення рівномірного розподілу потоку в шарі, що залежить, зокрема, від інтенсивності заростання або забивання газорозподільного пристрою, а також напрямки циркуляції твердої фази в апараті, може бути багато в чому вирішена за допомогою пристроїв з постійно оновлюваною поверхнею газорозподілу [1].

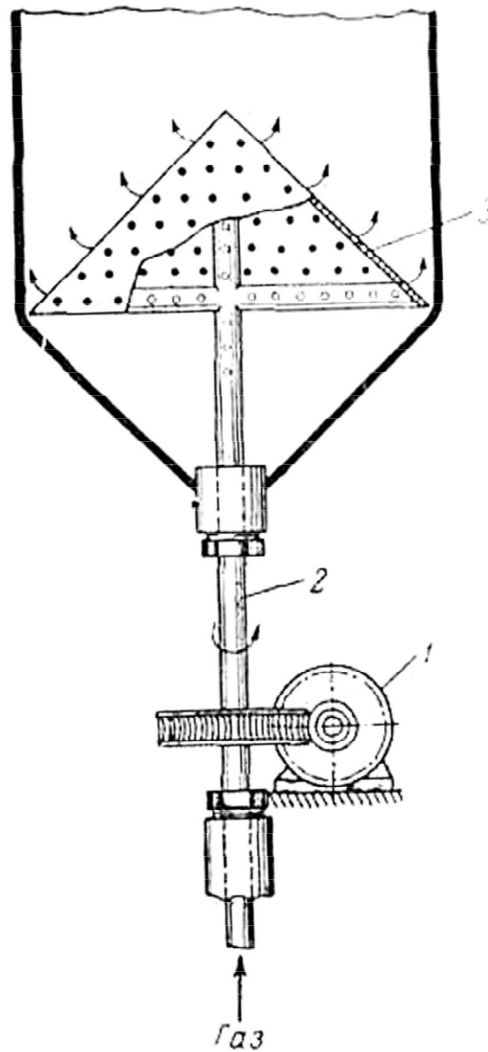


Рисунок 1.19 – Нижня частина апарату з обертовим розподільним конусом: 1 – привід валу; 2 – порожнистий вал; 3 – розподільний конус, що обертається

Встановлено [30], що при псевдозрідженні зернистого матеріалу рідиною потоки, що виходять з отворів розподільчих решіток, як і в разі псевдозрідження газом, утворюють над нею «факельну зону». Концентрація частинок в «факелах» відносно мала, а в проміжках між факелами, де тверді частинки опускаються, концентрація їх значно вище. Висота «факельної зони» (зони гідродинамічної стабілізації) визначається в основному тими інерційними силами, які були передані твердим частинкам струменями рідини (газу).

На нерухомій решітці «факели» мають в основному постійний характер і сприяють сталому каналоутворенню (наскрізному або частковому). У разі решітки, що обертається, утворення «факелів», мабуть, не відбувається (якщо не брати до уваги можливість їх появи у отворів в центрі решітки через те, що ці отвори або зовсім не переміщуються, або мають вельми невеликі лінійні швидкості руху), розміри зони стабілізації різко зменшуються і порозніть вирівнюється по висоті шару.



## **2 НОВИЙ АПАРАТ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ ЗА ПАТЕНТОМ УКРАЇНИ №59981**

Апарати з псевдозрідженим шаром широко застосовують в техніці для проведення реакційних, теплообмінних, масообмінних, а також механічних процесів.

Для гарантійної роботи такого апарата необхідна розподільна решітка, що забезпечить рівний потік зріджувального газу (рідини) в об'ємі псевдозріджувального шару. Тому дослідники при розробці апарата з псевдозрідженим шаром уділяють особливу увагу саме конструкції розподільної решітки.

Наприклад, відома розподільна решітка, що містить дві розташовані одна на одній прямокутні пластини з отворами однакових розмірів і форми, одна з яких споряджена механізмом зміщення відносно другої, згідно з пропонованою корисною моделлю, новим є те, що кроки розташування отворів у пластинах у напрямку відносного зміщення пластин виконані різними [31].

У найприйнятніших прикладах виконання решітки різниця кроків розташування отворів у пластинах на перевищує подвоєного розміру отворів у напрямку відносного зміщення пластин, а отвори в пластинах виконані прямокутними, менша сторона яких розташована в напрямку відносного зміщення пластин.

Виконання пластин з різними кроками отворів дозволяє регулювати живий переріз на різних ділянках решітки вздовж однієї зі сторін, а отже створювати ефективний циркуляційний рух матеріалу вздовж зазначеної сторони решітки при значному спрощенні конструкції механізму відносного зміщення пластин.

Забезпечення різниці кроків розташування отворів у пластинах не більше зазначеної величини дозволяє створювати одну або дві циркуляційні

зони в об'ємі апарата (в останньому випадку, крім того, з висхідним потоком по центру або по краях решітки), а виконання отворів прямокутними створює найбільш стійкий режим циркуляційного псевдозрідження.

Суть пояснюється кресленням, на якому зображена розподільна решітка (рисунок 2.1).

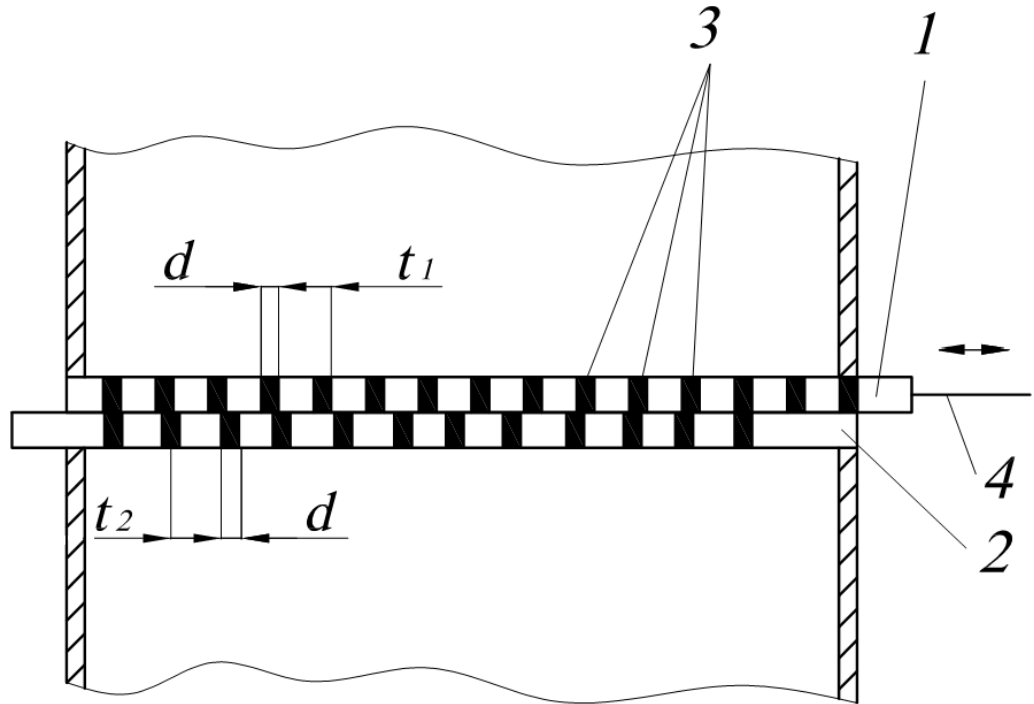


Рисунок 2.1 – Розподільна решітка:

1,2 – прямокутні пластини; 3 – отвори; 4 – механізм зміщення пластин

Недоліком цієї розподільної решітки є те, що на периферії шару і у його основі між отворами розподільної решітки є застійні зони зернистого матеріалу. Це призводить до нерівномірного розподілу по об'єму шару потоку зріджувального агента [1] і, як наслідок цього, зменшення, наприклад, коефіцієнта масопередачі.

Відомий газорозподільний пристрій в апараті для псевдозрідження твердого зернистого матеріалу, який виконаний у вигляді піщаного сухого ливарного стрижня (рисунок 2.2) [32].

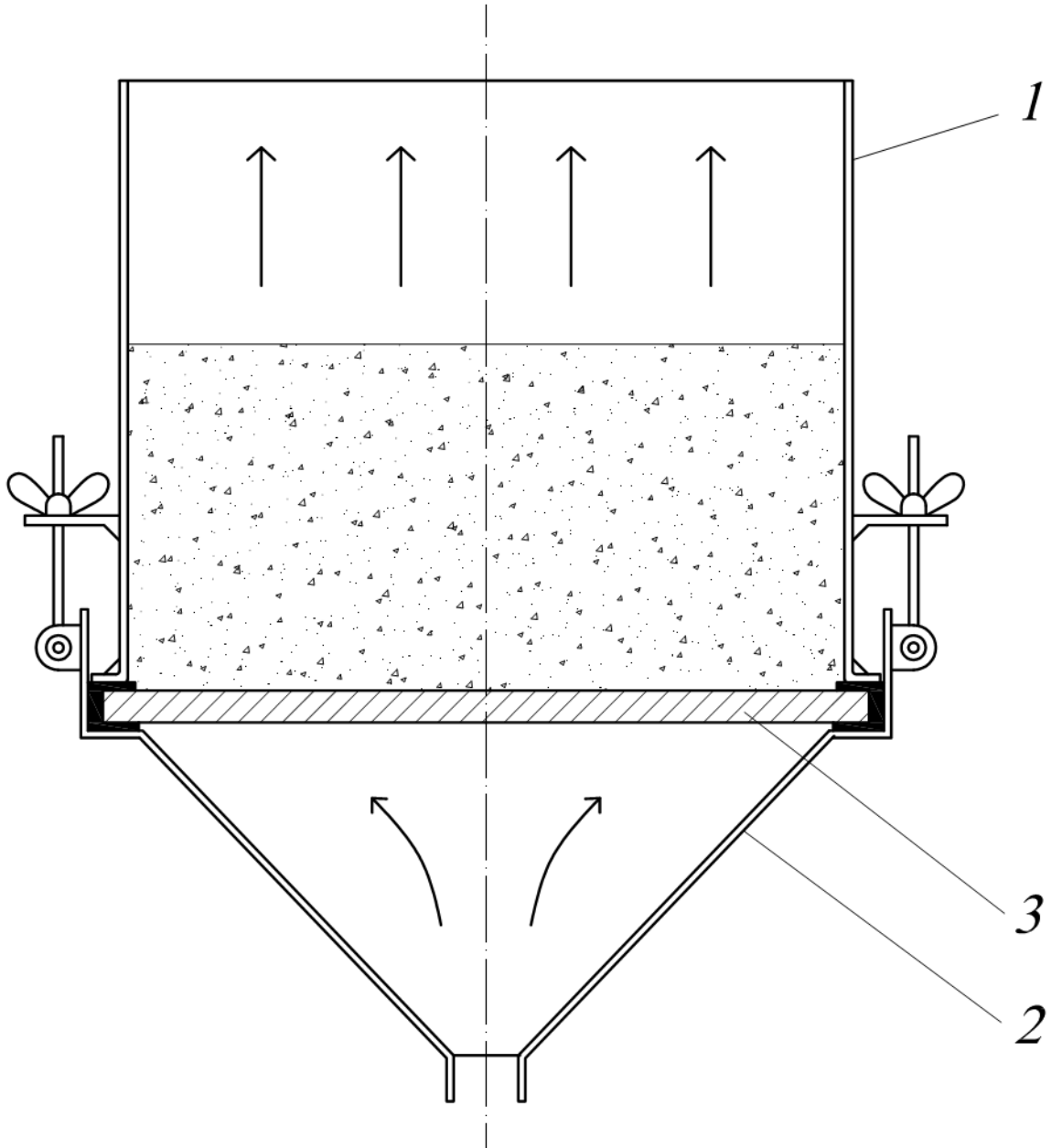


Рисунок 2.2 – Апарат для псевдозрідження  
твердого зернистого матеріалу:

1 – корпус; 2 – вхідний конус; 3 – піщаний сухий ливарний стрижень

Недоліком цього газорозподільного пристрою є те, що піщаний сухий ливарний стрижень, який являє собою капілярно-пористе тіло, може мати неоднаковий тиск на різних своїх ділянках, до того ж йому притаманне швидке забивання. В цьому випадку на пористій плиті з'являються застійні зони зернистого матеріалу, які призводять до нерівномірності псевдозрідження і відповідно до зниження ефективності процесу.

Відомий також газорозподільний пристрій для апаратів з псевдозрідженим шаром, який включає перфоровану решітку і розміщений на ній шар гранульованого матеріалу, а над шаром гранульованого матеріалу є шар тканини, яка закріплена на корпусі апарата по периферії [33]. Слід зауважити, що газорозподільний пристрій може мати два варіанта конструктивного виконання. По першому варіанту з щільною компоновкою гранульованого матеріалу між газорозподільними решітками і по другому – нещільною (рисунок 2.3).

Недоліком цього газорозподільного пристрою, який складається з двох газорозподільних решіток і вміщеного між ними гранульованого матеріалу, є те, що він не забезпечує рівномірного псевдозрідження при неоднорідній локальній порозності псевдозрідженого шару або при порушенні горизонтальності газорозподільних решіток. Неоднорідна локальна порозність псевдозрідженого шару може бути спричинена розміщенням в шарі теплообмінних труб або інших елементів або/і грудкуватістю самого зернистого матеріалу. Горизонтальність газорозподільних решіток може бути порушена при їх локальному перегріві і жолобленні внаслідок температурного перепаду. Ці недоліки властиві й іншим аналогічним газорозподільним пристроям, які наведені вище.

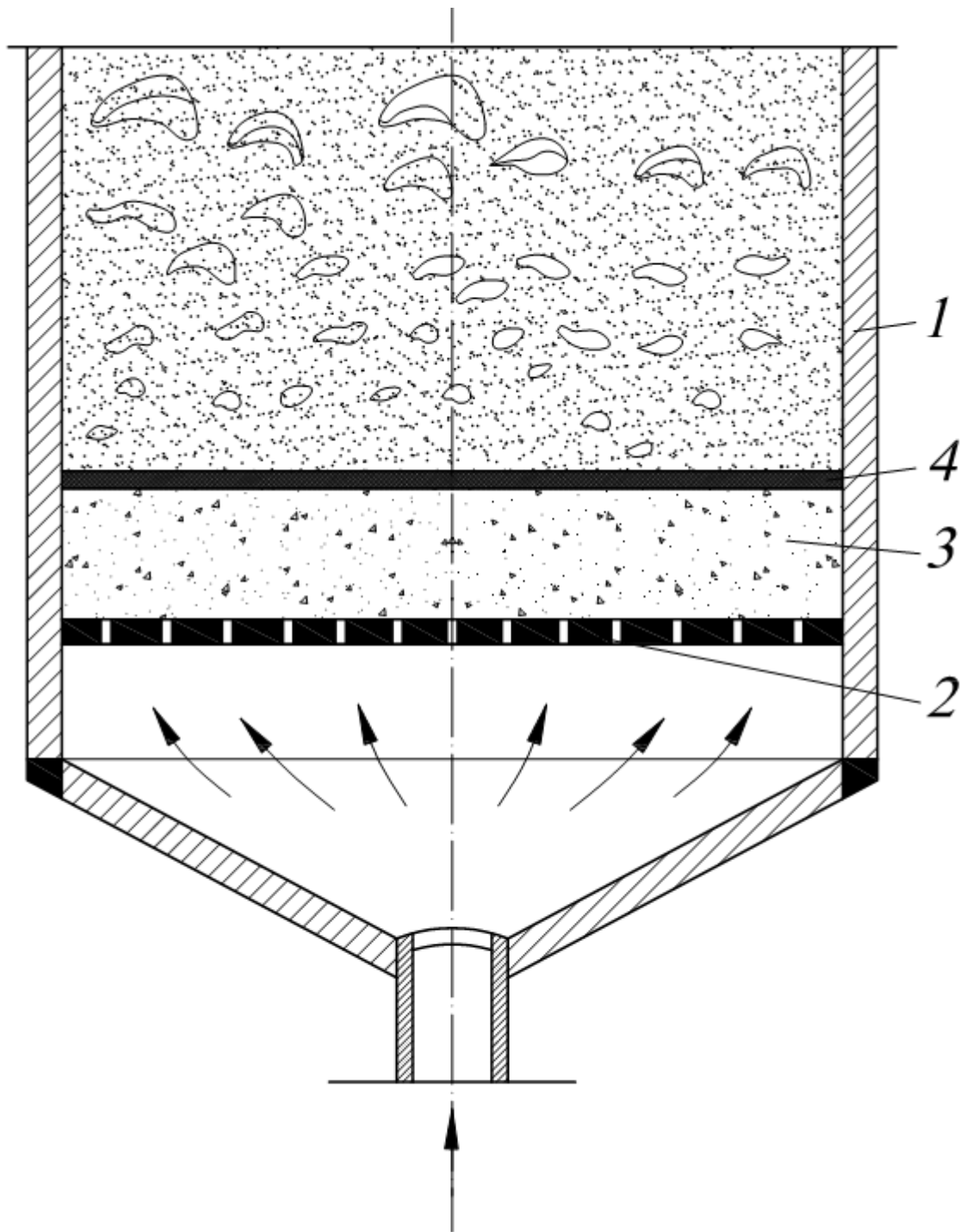


Рисунок 2.3 – Газорозподільний пристрій для апаратів з псевдо зрідженим шаром:

1 – циліндрична обичайка; 2 – перфорована решітка; 3 – гранульований матеріал; 4 – шар тканини

В основу поставлена задача створення такого газорозподільного пристрою для апаратів з псевдозрідженим шаром, в якому забезпечується рівномірне псевдозрідження при будь-яких неоднорідностях локальної порозності псевдозрідженого шару або/і не горизонтальності газорозподільної решітки, що ліквідує недоліки при проведенні реакційних, теплообмінних, масообмінних або механічних процесів.

Поставлена задача здійснюється завдяки тому, що новий газорозподільний пристрій [34] містить верхню газорозподільну решітку, розташовану над шаром гранульованого матеріалу, розміщеним на нижній газорозподільній решітці, де гранульований матеріал секціонований перегородками (рисунок 2.4).

Газорозподільний пристрій, вміщений в циліндричну обичайку апарата 1 з псевдозрідженим шаром 2, працює наступним чином.

Газ подають на нижню газорозподільну решітку 3, де він розподіляється по поперечному перерізу апарата. Гранульований матеріал 4, попередньо спеціально нещільно розміщений між нижньою газорозподільною решіткою 3 і верхньою газорозподільною решіткою 5, приходить до завислого стану і створює під верхньою газорозподільною решіткою 5 динамічно активний секціонований перегородками 6 шар. Змінна товщина шару гранульованого матеріалу 4, який секціонований перегородками 6 по всьому поперечному перерізу апарата 1, залежить від неоднорідної локальної порозності псевдозрідженого шару 2 або/і не горизонтальності верхньої газорозподільної решітки 5. Збільшення локальної порозності псевдозрідженого шару 2 призведе до збільшення локальної швидкості газу в цьому місці, що, в свою чергу, спричинить локальний ріст товщини шару гранульованого матеріалу 4 під верхньою газорозподільною решіткою 5 до тих пір, поки його гідравлічний тиск не компенсує падіння локального тиску псевдозрідженого шару 2. При зменшенні локальної порозності псевдозрідженого шару 2 все діється у зворотному напрямку.

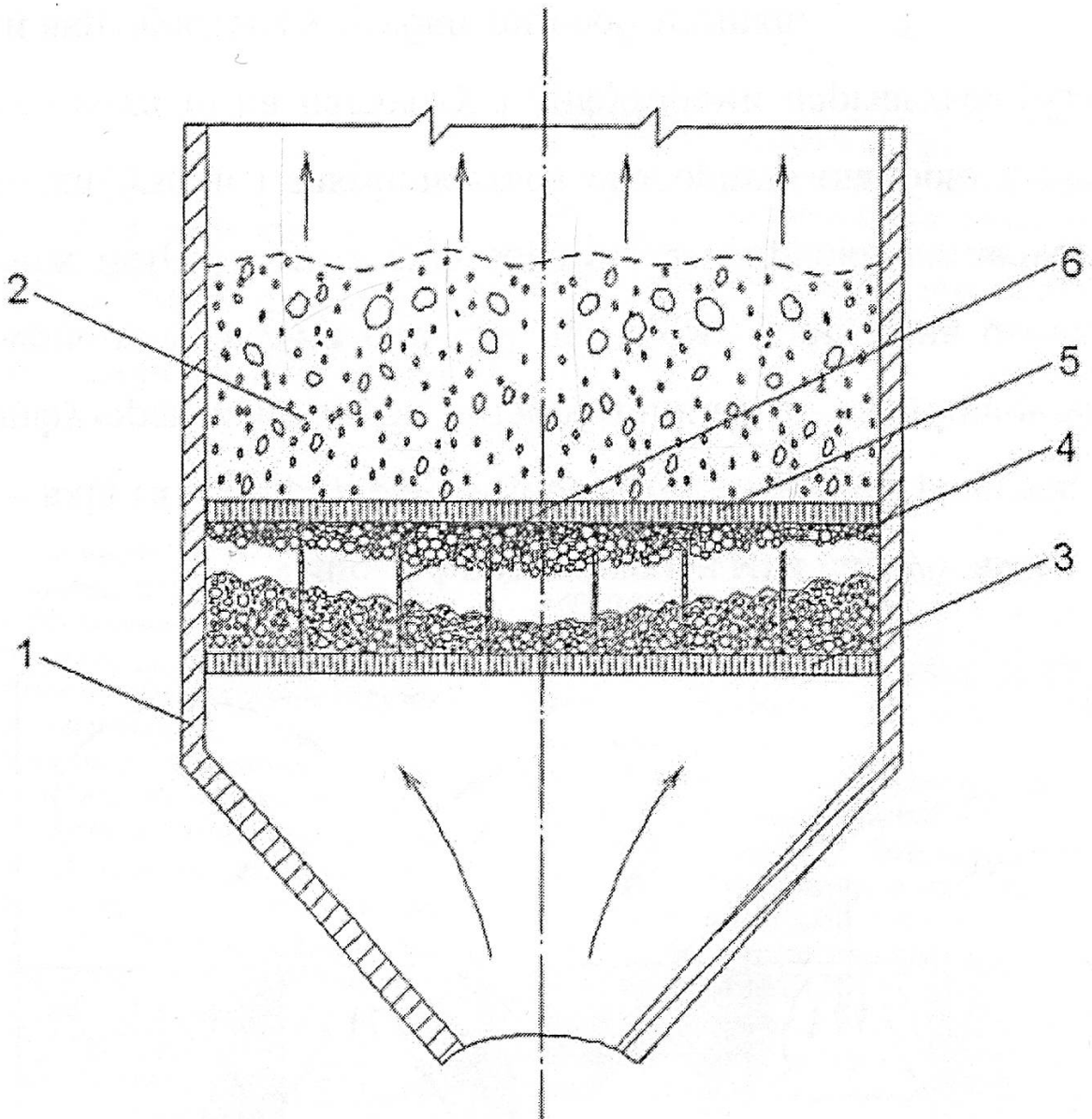


Рисунок 2.4 – Апарат з псевдозрідженим шаром  
за патентом України № 59981:

1 – циліндрична обичайка, 2 – псевдозріджений шар, 3 – нижня газорозподільна решітка, 4 – гранульований матеріал, 5 – верхня газорозподільна решітка, 6 – перегородка

Таким чином, будь-яка зміна неоднорідності локальної порозності псевдозріженого шару 2 або/і не горизонтальності верхньої газорозподільної решітки 5 автоматично спричинить зміну товщини шару секціонованого гранульованого матеріалу 4, забезпечуючи тим самим рівномірне псевдозрідження.



### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 3.1 Опис схеми експериментальної установки

Ефективність роботи апарату з псевдозрідженим шаром багато в чому залежить від рівномірності розподілу газу за поперечним перетином апарату. Порушення нерівномірності псевдозрідження може бути викликано незадовільним первинним розподілом газу, а також нерівністю конструкції розподільної решітки, наприклад, внаслідок впливу на неї високих температур.

Аналіз сталої роботи апарату з псевдозрідженим шаром був проведений на експериментальній установці, схема якої представлена на рисунку 3.1 Основними пристроями були: компресор 1, вентиль 2, ротаметр 3, поворотний механізм 4, експериментальна колонка 5, диференційний манометр 6, транспортер 7, стрілка 8.

Повітря на установку подавали за допомогою компресора 1, кількість якого регулювали вентилем 2, а його об'ємну витрату контролювали ротаметром 3. Основним апаратом дослідження була скляна колонка 5 внутрішнім діаметром 57 мм. Повітря спрямовували в нижню частину колонки, виконану у вигляді дифузора, що гарантувало рівномірну первинну подачу повітря. В колонку для дослідження на основну верхню газорозподільну решітку розташовували 33 г зернистого матеріалу насипною щільністю  $1724 \text{ кг/м}^3$ , фракційний склад якого становив  $0,25 - 1,0 \text{ мм}$ . Під основною газорозподільною решіткою була вмонтована додаткова нижня газорозподільна решітка (металева сітка), на якій розміщували 53 г гранульованого матеріалу насипною щільністю  $869 \text{ кг/м}^3$  з фракційним складом  $0,3 - 0,8 \text{ мм}$ . Колонка була оснащена поворотним механізмом 4 і транспортером 7 зі стрілкою 8. Експериментальна колонка 5 і стрілка 8 були розташовані на одній осі і жорстко пов'язані з поворотним механізмом 4.

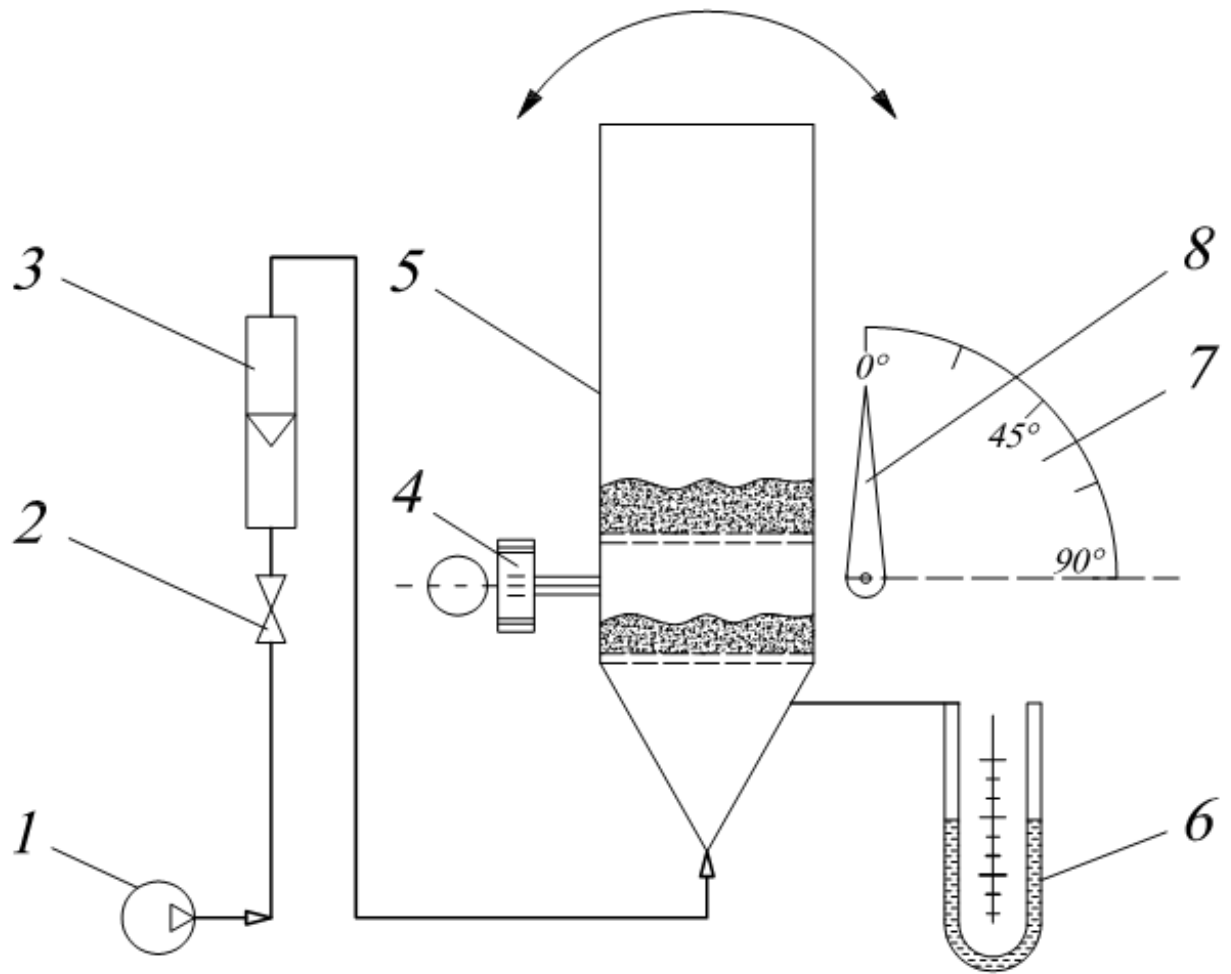


Рисунок 3.1 – Схема експериментальної установки для дослідження стійкості режиму роботи апарата з псевдозрідженим шаром:

- 1 – компресор, 2 – вентиль, 3 – ротаметр, 4 – поворотний механізм, 5 – експериментальна колонка, 6 – диференційний манометр,  
7 – транспортер, 8 – стрілка

Гідравлічний опір псевдозрідженого шару в колонці вимірювали диференціальним манометром 6. Розподільні решітки мали незначний гідравлічний опір, тому при обробці експерименту гідравлічним опором решіток нехтували.

### 3.2 Методи, прибори та вимірювальна техніка і пристрої

Методика проведення експерименту. Рівномірність псевдозрідження оцінювали за допомогою вимірювання гідравлічного опору псевдозрідженого шару при змінному куті відхилення колонки від вертикальної осі. У нижню частину колонки подавали повітря в кількості 2,8 м<sup>3</sup>/год, достатнім для проведення процесу псевдозрідження.

Колонку встановлювали під заданим кутом і подавали повітря в нижню частину колонки, що сприяло підняттю гранульованого матеріалу на газорозподільних решітках. Візуально спостерігали за поведінкою зернистих шарів і фіксували гідравлічний опір. Верхній шар зернистого матеріалу переходив в стан псевдозрідження, а нижній «залипав» під нижньою газорозподільною решіткою. Залежно від кута нахилу колонки фактично спостерігали два крайніх режими. Якщо кут нахилу був невеликий, то шари зернистого матеріалу над та під основною газорозподільною решіткою формували єдиний шар, і його гідравлічний опір був максимально можливим. У разі, якщо кут нахилу був значним, то шари зернистого матеріалу над та під основною газорозподільною решіткою не могли сформувати єдиний шар, його висота по перетину була нерівною. В результаті гідравлічний опір такого псевдозрідженого шару різко зменшувалася.

Характерні режими роботи апарату з двома зонами псевдозріджених шарів показані на рисунку 3.2. На рисунку 3.2 а) апарат знаходиться у вертикальному стані і зрідження зернистих шарів призводить до «залипання»

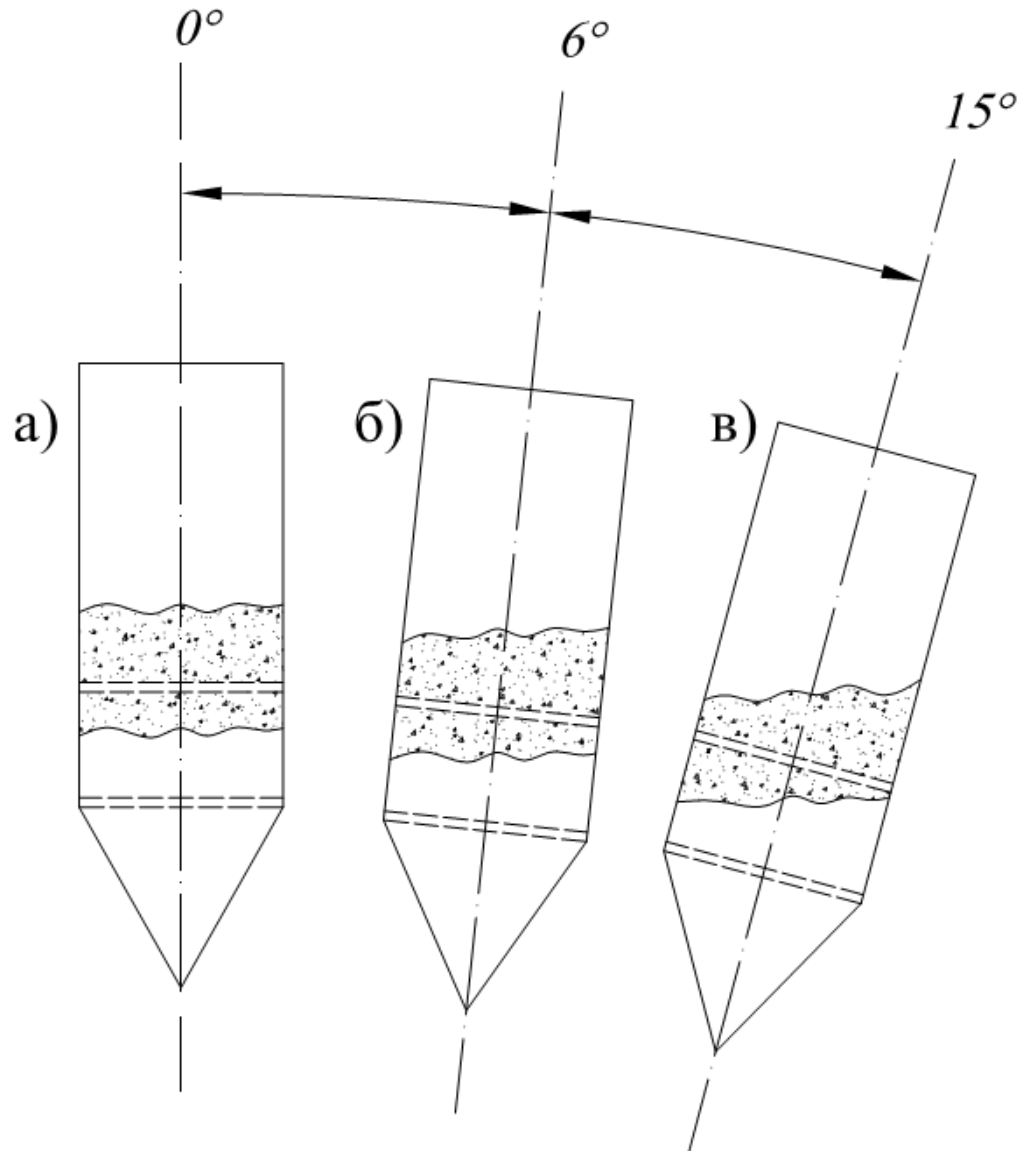


Рисунок 3.2 – До методики проведення експерименту:

а) кут нахилу колонки  $0^\circ$ ; б) кут нахилу колонки  $6^\circ$ ;

в) кут нахилу колонки  $15^\circ$

нижнього шару під верхньою решіткою і псевдозрідженню верхнього шару. При цьому гідравлічний опір максимально можливий, що свідчить про нормальну роботу апарату. На рисунку 3.2 б) колонка має кут нахилу, рівний  $6^\circ$ . Формується новий стан псевдозрідженого шару таким чином, що загальна висота двох шарів дорівнює висоті шарів зображених на рисунку 3.2 а). Гідравлічний опір псевдозріджених шарів буде рівним гідравлічному опору для колонки, розташованої вертикально, що свідчить про задовільну роботу апарату. Колонка зі значним нахилом, рівним  $15^\circ$ , зображена на рисунку 3.2 в). Тут видно порушення верхнього псевдозрідженого шару – спостерігається часткове оголення верхньої газорозподільної решітки і недостатня кількість гранульованого матеріалу для компенсації загальної висоти псевдозріджених шарів. В результаті в цьому локальному місці буде спостерігатися прорив газу. Підтвердженням порушення режиму псевдозрідження буде свідчити різке зменшення гідравлічного опору псевдозрідженого шару. Це випадок істотного порушення горизонтальності газорозподільної решітки і він не може бути рекомендований для промислової експлуатації.

Основними приладами для проведення експериментальних досліджень служили ротаметр і диференційний манометр. Повітря нагнітали поршневим компресором. Кут нахилу колонки вимірювали за допомогою транспортира.

Основа **ротаметра** (рисунок 3.3) – конічна трубка, що розходить вгору. В середині трубки вільно переміщається поплавець-індикатор. Потік газу (рідини) для вимірювання рухається по трубці знизу, піднімаючи поплавок. Піднімаючись все вище, поплавець звільняє більше простору всередині трубки для руху вимірюваної субстанції. Піднявшись до положення, в якому сила тяжіння врівноважує силу підйому, поплавок завмирає на одному місці. Для кожного положення поплавця визначається витрата вимірюваної субстанції. Фіксується таке відповідність на стінках посудини у вигляді калібрувальних міток.

Трубки ротаметрів можуть виконуватися зі скла (витримують тиск до 2,5 МПа) або з металу (до 70 МПа). Матеріал для виготовлення поплавця підбирають, виходячи з параметрів вимірюваної речовини, зазвичай це метал або пластмаса.

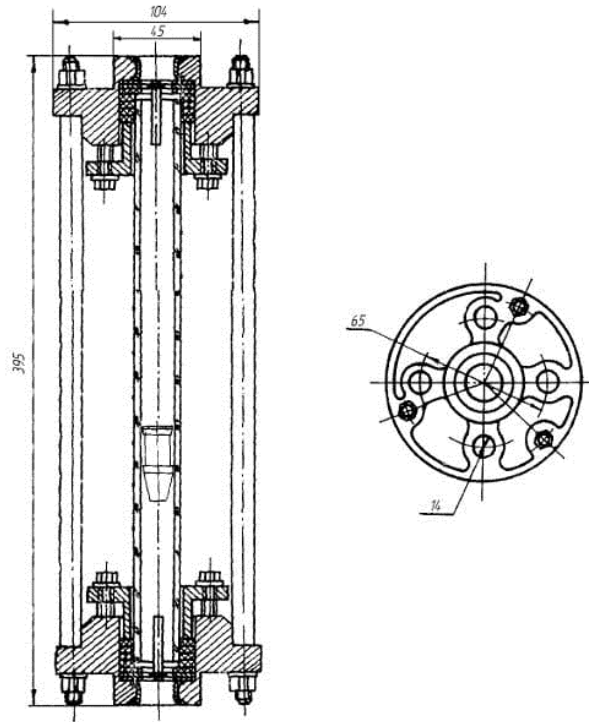


Рисунок 3.3 – Ротаметр скляний для газових середовищ

Переваги:

- прилад порівняно простий, тому можна розраховувати на його тривалу і надійну роботу;
- ротаметри знаходять все більше сфер застосування, так як для їх виробництва не потрібні дорогі матеріали і складні технологічні рішення.

Недоліки:

- для правильної роботи вимірювальної системи ротаметр слід розташувати строго вертикально;
- висота, до якої зможе піднятися індикатор, буде залежати від в'язкості і щільності речовини;

– якщо експлуатація ротаметра передбачає оптичне зчитування розташування індикатора, прилад зможе вимірювати тільки прозорі речовини.

**Диференційний манометр** вимірює різницю двох тисків. Даний прилад підходить для контролю забруднення фільтрів, вимірювання рівня в закритих ємностях, вимірювання надлишкового тиску в чистих приміщеннях, вимірювання потоку газоподібних і рідких середовищ, а також контролю насосних установок.

U-подібний манометр – це рідинний манометр, що складається зі сполучених посудів, в яких вимірюваний тиск визначають по одному або декількох рівнях рідини.

В U-подібних скляних манометрах вільний кінець трубки сполучається з атмосферою, а до іншого кінця підводиться вимірюваний тиск. Найпростіша схема вимірювання тиску рідинним скляним манометром показана на рисунку 3.4.

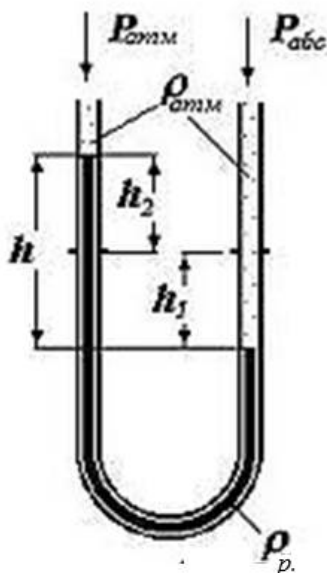


Рисунок 3.4 – Схема функціонування скляного рідинного манометра

Атмосферний тиск  $P_{атм}$  впливає на один кінець U-подібної трубки, частково заповненою робочою рідиною. Інший кінець трубки за допомогою різного роду підвідних пристроїв з'єднаний з областю вимірюваного тиску  $P_{абс}$ . При  $P_{абс} > P_{атм}$  рідина, що знаходиться в частині підведеного вимірюваного тиску, буде витіснятися в частину, сполучену з атмосферою. В результаті між рівнями рідин, що знаходяться в різних частинах U-подібної трубки, утворюється стовп рідини, висота  $h$  якого визначається з виразу:

$$h = (P_{абс} - P_{атм}) / ((\rho_p - \rho_{атм})g) \quad (3.1)$$

Висота стовпа робочої рідини  $h$  складається з двох частин: висоти  $h_1$ , що представляє зниження стовпа рідини щодо початкового – «нульового» рівня, і висоти  $h_2$  – що відображає його підвищення в іншій частині U-подібної трубки, тобто збільшення щодо початкового положення – («нуля»).

Щільністю навколишнього середовища, тобто повітря через умову  $p_p \gg p_{атм}$  можна знехтувати. Залежність (3.1) може бути представлена як

$$h = p_{над} / (\rho_p g) \quad (3.2)$$

З (3.2) вимірюваний надлишковий тиск, що визначається за допомогою скляного рідинного диференційного манометра, може визначатися як [35]

$$p_{над} = h \rho_p g \quad (3.3)$$

При замірювання витрати газу часто необхідно приводити стан газу до нормальних умов.

Дифманометри виготовляють згідно ГОСТ 18140-84.

Для забезпечення коректності вимірювань обов'язковим є очищення внутрішніх поверхонь скляних трубок від пилу і бруду. З цією метою скляні рідинні манометри промивають насиченим розчином біхромату калію в сірчаній кислоті, потім – спиртом і водою [36].

**Транспортир** – інструмент для побудови та вимірювання кутів. Транспортир складається з лінійки (прямолінійної шкали) і півкола (кутомірної шкали), розділеного на градуси від 0 до 180°. Точність транспортира прямо пропорційна його розміру.

**Поршневий компресор** – механічний пристрій, який збільшує тиск газу зарахунок зменшення його об'єму. Компресор може створювати тиск (стисливої речовини), або наприклад транспортувати газ через труби.

Принцип дії поршневого компресора покладений на використання рухомих поршнів, що приводяться в рух колінчастим валом, або ексцентриком (рисунок 3.5).



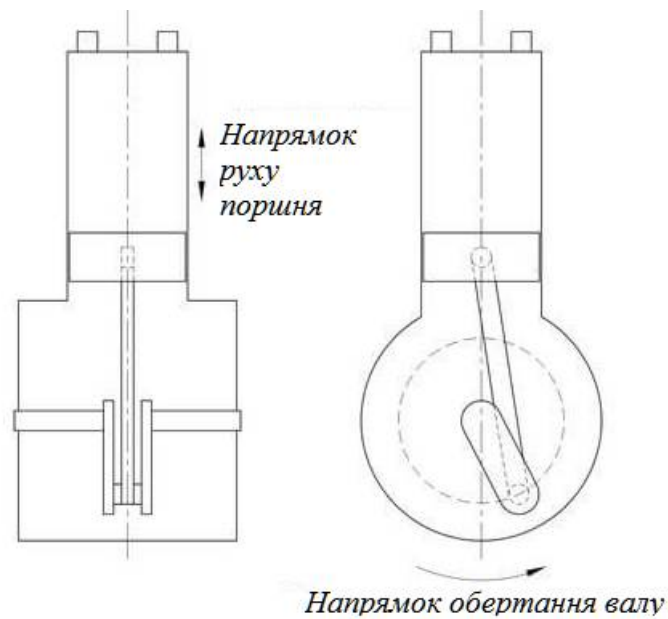


Рисунок 3.5 – Улаштування поршневого компресору

Робочі цикли компресора.

Етап 1. При русі поршня вниз об'єм простору над поршнем у циліндрі циліндра збільшується і тиск в ньому зменшується.

Етап 2. Коли тиск у циліндрі стане нижчим, ніж тиск у камері всмоктування голівки, відкриється всмоктуючий клапан і газ по всмоктуючому трубопроводу поступає в циліндр. Почнеться процес всмоктування. Він буде тривати доти, поки поршень, досягнувши крайнього нижнього положення (нижня мертва точка) в циліндрі, не почне рухатися вгору. Об'єм простору над поршнем у циліндрі буде зменшуватися, а тиск, відповідно, рости.

Етап 3. Як тільки тиск в циліндрі перевищить тиск у камері всмоктування голівки, всмоктуючий клапан закриється і процес всмоктування закінчиться. Розпочнеться стиснення газу. Процес стиснення буде відбуватися доти, доки тиск газу в циліндрі не перевищить тиску в камері нагнітання голівки.

Етап 4. У результаті попереднього етапу відкриється нагнітальний клапан. Почнеться процес нагнітання, тобто виштовхування стисненого газу з циліндра компресора в нагнітальний патрубок [37].

### 3.3 Результати експериментальних досліджень

Провели серію експериментів, результати яких зведені в таблиці.

Експеримент 1. За умовою першого експерименту гранульований матеріал між верхньою і нижньою решіткою був щільно затиснутий. Це сприяло псевдозріджених основного зернистого матеріалу і нерухомості допоміжного. Колонку повертали на заданий кут і фіксували гідравлічний опір шару псевдозрідженого зернистого матеріалу. Результати експерименту зведені в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати експерименту №1

Кут відхилення апарата, °	0	2	4	6	8	10	15
Гідравлічний опір псевдозрідженого шару, Па	127,0	109,0	100,0	91,0	91,0	91,0	91,0

Спостерігається локальний прорив газу через псевдозріджений шар; явище підсилюється зі збільшенням кута відхилення апарата від вертикальної осі.

Експеримент 2. Повторюють експеримент 1, але гранульований матеріал нещільно розміщений між газорозподільними решітками газорозподільного пристрою. Результати зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати експерименту №2

Кут відхилення апарата, °	0	2	4	6	8	10	15
Гідравлічний опір псевдозрідженого шару, Па	127,0	121,5	121,5	121,5	110,5	110,5	88,5

Від пуску до пуску гранульований матеріал зсувається в сторону нахилу апарата. Спостерігається загальна неоднорідність псевдозрідження, яка посилюється зі збільшенням кута відхилення апарата від вертикальної осі.

Експеримент 3. Повторюють експеримент 2, але у новому газорозподільному пристрої гранульований матеріал секціонували перегородками. Результати зведені до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати експерименту №3

Кут відхилення апарата, °	0	2	4	6	8	10	15
Гідравлічний опір псевдо-зрідженого шару, Па	127,0	127,0	127,0	127,0	127,0	127,0	121,5

При куті відхилення апарата від вертикальної осі, рівному 15°, спостерігається оголення верхньої газорозподільної решітки.

#### 4 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

За результатами експериментального досліджень побудували залежності гідравлічного опору шару псевдозрідження від кута нахилу колонки  $\Delta P = f(\text{Кут нахил, } ^\circ)$  для трьох випадків, що представлені на рисунку 4.1. Проведено три експеримент. На рисунку 4.1 а) показана залежність  $\Delta P = f(\text{Кут нахилу, } ^\circ)$  для випадку, коли нижній гранульований шар щільно затиснутий між газорозподільними решітками. Незначний нахил колонки на 2-4 градуси призводить до різкого зменшення гідравлічного опору псевдозрідженого шару через локальний пробой газу в верхньому псевдозрідженому шарі. Подальше збільшення нахилу колонки не призводить до зниження гідравлічного опору. На рисунку 4.1 б) показана залежність  $\Delta P = f(\text{Кут нахилу, } ^\circ)$  для випадку, коли нижній гранульований шар вільно розміщений на нижній газорозподільній решітці. Нахил колонки на 2–4 градуси призводить до незначного зменшення гідравлічного опору, проте нахил 8–10 градусів вже виявляє локальний прорив газу через верхню газорозподільну решітку, на якій має місце зміщення псевдозрідженого шару. На рисунку 4.1 в) показана залежність  $\Delta P = f(\text{Кут нахилу, } ^\circ)$  для випадку, коли нижній гранульований шар секціоновано вертикальними перегородками. Нахил колонки на 2–10 градусів не змінює гідравлічного опору псевдозрідженого шару. Причиною служить відсутність переміщення нижнього гранульованого шару за поперечним перетином колонки. Це свідчить про те, що зміна горизонтальності газорозподільної решітки або незадовільний розподіл потоку на вході в апарат буде компенсовано секціонованим гранульованим шаром, а ефективність роботи такого апарату буде максимально можливою. Такий апарат з псевдозрідженим шаром найкращий і може бути рекомендований до промислового випробування.

Запропонований газорозподільний пристрій за патентом України №59981 для апаратів з псевдозрідженим шаром має здібність автоматично

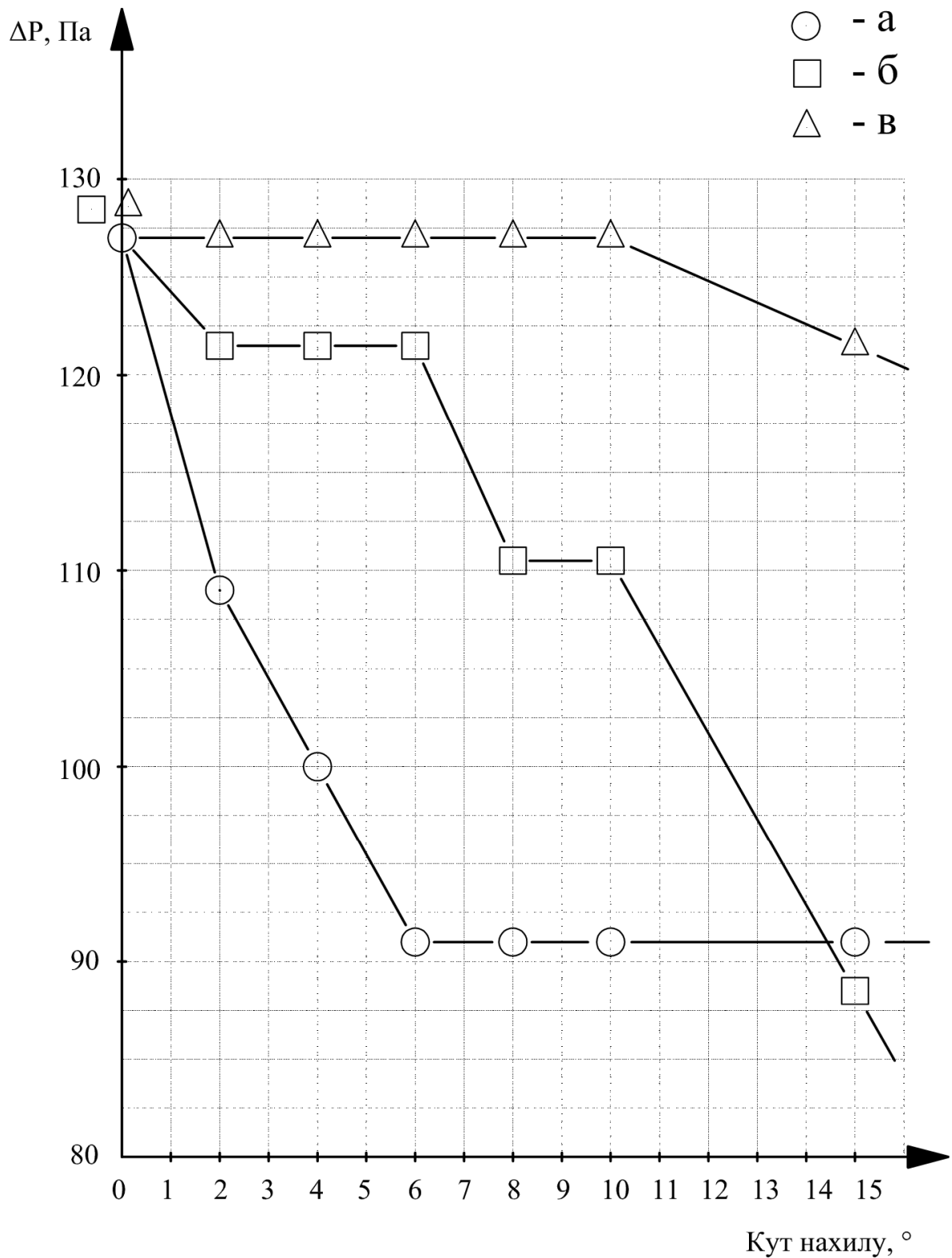


Рисунок 4.1 – Залежність гідравлічного опору псевдозрідженого шару від кута нахилу колонки  $\Delta P = f(\text{Кут}, ^\circ)$ :

а – нижній гранульований матеріал, щільно затиснутий між решітками; б – гранульований матеріал, нещільно затиснутий між решітками; в – гранульований матеріал, секціонований вертикальними перегородками

компенсувати неоднорідну локальну порозність псевдозрідженого шару або/і відхилення газорозподільної решітки від горизонтальності і забезпечити рівномірне псевдозрідження, що тим самим дозволяє проводити стійкий процес з максимально можливою інтенсивністю.

## ВИСНОВКИ

За результатами виконання дипломної роботи вирішена задача створення такого газорозподільного пристрою для апаратів з псевдозрідженим шаром, в якому забезпечується рівномірне псевдозрідження.

На підставі проведення експериментальних досліджень сформульовані наступні висновки:

1. проведено літературний огляд основних положень гідродинаміки псевдозрідженого шару, основних характеристиками зернистого шару, розглянуто будову та принцип роботи апаратів з псевдозрідженим шаром, а також їх основні конструктивні вузли;

2. для досягнення рівномірності псевдозрідження запропоновано конструкцію газорозподільного пристрою за патентом України №59981, що містить верхню газорозподільну решітку, розташовану над шаром гранульованого матеріалу, розміщеним на нижній газорозподільній решітці, де гранульований матеріал секціонований перегородками;

3. експерименти проводилися на експериментальній установці, де основним апаратом дослідження була скляна колонка 5 внутрішнім діаметром 57 мм, оснащена поворотним механізмом, гідравлічний опір псевдозрідженого шару в колонці при різних кутах нахилу вимірювали диференціальним манометром;

5. за результатами експериментальних досліджень визначено, що запропонований газорозподільний пристрій для апаратів з псевдозрідженим шаром має здібність автоматично компенсувати неоднорідну локальну порозність псевдозрідженого шару або/і відхилення газорозподільної решітки від горизонтальності і забезпечує рівномірне псевдозрідження.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Гельперин Н. И. Основы техники псевдооживления / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша – М.: Химия, 1967. – 664 с.
2. Ромашов П. Г., Курочкина М. И. Гидромеханические процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1974. – 288 с.
3. Замирян А.А. Абсорберы с псевдооживленной насадкой / А. А. Замирян, В. М. Рамм – М.: Химия, 1980. – 184 с.
4. Левш И. П. Докт. дисс., Ташкентск. политехи, ин-т, 1975. – 120 с.
5. Серманизов С.С. Химическая технология и силикаты / С. С. Сермазинов, О. С. Балабеков – Алма-Ата: Наука, 1974. – 193 с.
6. Котов В. М. Аппараты с псевдооживленным слоем орошаемой насадки и возможности их применения в процессах очистки газов и пылеулавливания / В. М. Котов, А. Ю. Вальдберг, Н. И. Гельперин. – М., ЦНИИТЭнефтехим, 1970. – 50 с.
7. Бляхер И. Г. Хим. нефт. маш. – 1967. – № 2. – С. 18-21.
8. Замирян А. А. Труды НИУИФ им. Я. В. Симойлова. – 1970. – вып. 214. – С. 82-91.
9. Протодьяконов И.О. Гидромеханика псевдооживленного слоя – Л.: Химия, 1982. – 264 с.
10. Гельперин Н. И. Теор. основы хим. технол. – 1968. – т. 2. – № 1. – С. 76-83.
11. Балабеков О. С. ЖПХ. – 1971. – т. 44. – № 5. – С. 1061-1069.
12. Гельперин Я.И. Теоретические основы химической технол. – 1972. – т. 6. – № 4. – С. 534-538.
13. Псевдооживление // Пер. с англ. – М., Химия, 1974. – 728 с.
14. Richardson I. F. Trans. Inst. Chem. Eng. – 1954. – v. 3. – P.25-27.



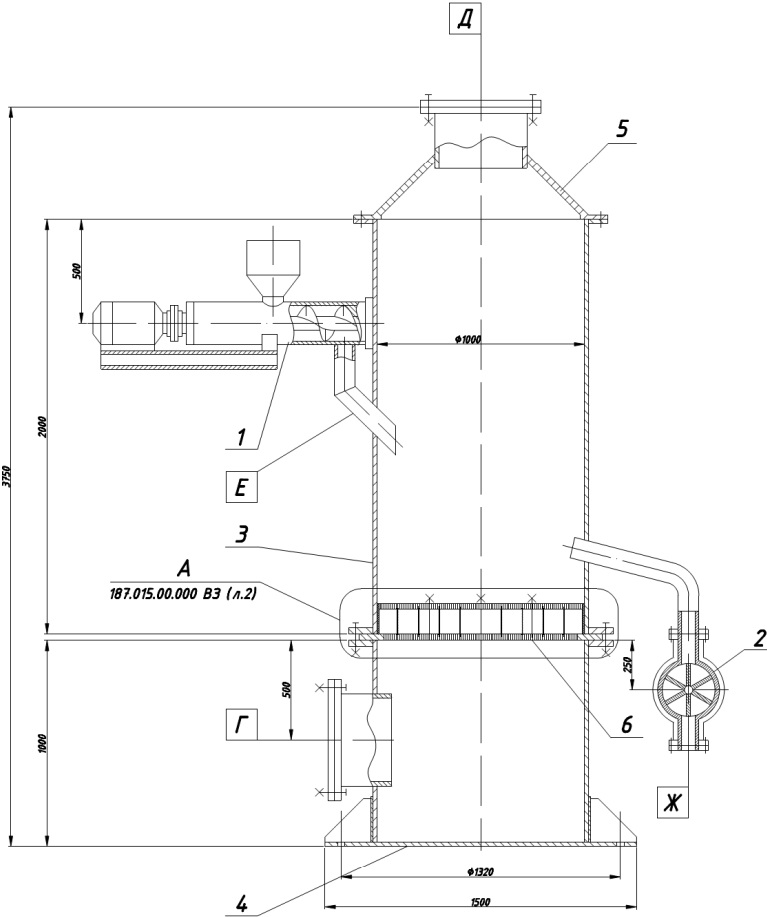
15. Мухленов И. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя. Справочник / Под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
16. Куний Д. Промышленное псевдоожижение. Монография // Пер. с англ. — М.: Химия, 1976. – 448 с.
17. Мухленов И. П. Катализ в кипящем слое / Под ред. И. П. Мухленова, – Л., 1971. – 325 с.
18. Ойгенблик А. А. Аппараты с неподвижными и кипящими слоями в хлорной промышленности / Под ред. А. А. Ойгенблика. – М., 1988. – 215 с.
19. Романков П.Г. Массообменные процессы химической технологии / П. Г. Романков, В. Ф. Фролов – Л.: Химия, 1975. – 336 с.
20. Wicke E. Chem.-Ing. Techn. – 1952. – № 2. – P. 82.
21. Grohse E. W. AIChE Journal. – 1955. – № 3. – P. 18–22.
22. Rowe P. N. Trans. Instn. Chem. Eng. (London). – 1961 – №3. – P. 69.
23. Фрайман Р. С Хим. и технол. топлив и масел. – 1963. – № 8. P. 44.
24. Зак М. С. Хим. маш. – 1963. – № 3. – P. 8-10.
25. Stewart R.S., Davidson J.F. Chem. Eng. Sci. – 1964. – № 4. – P. 216-218.
26. Алиев В.С. Исследования в области каталитического крекинга нефтяного сырья с применением техники кипящего слоя / В. С. Алиев, Н. М. Индюков, С. А. Ефимова, М. А. Гончарова, И. И. Сидорчук. – Баку: Изд. АН АзССР, 1962. – 216 с.
27. Обрядчиков С. П. Технология нефти, ч. II. – Гостоптехиздат, 1952. – 328 с.
28. Устинов Б. М. Хим. пром. – 1962. – № 11. – С. 72-75.
29. Belik L. Chem.-Ing. Techn. – 1960. – № 4, 253. – P. 32.
30. Обрядчиков С.И. Нефт. хоз. – 1946. – № 11. – P. 36.

31. Пат. України 1656 У, МПК В01J 8/24. Розподільна решітка апарата псевдозрідженого шару // І.О. Мікульонок. – № 2002032424; Заявл. 27.03.2002; Опубл. 17.03.2002. Бюл. №3. – 5 с.
32. Пат. РФ № 2149683, МПК В01J8/24, В01J8/44; Заявл. 27.04.1999; Опубл. 27.05.2000. – 3 с.
33. Авт. св. СРСР № 967544, МПК ВОШ/44; Заявл. 01.02.1980; Опубл. 23.10.1982. Бюл. № 39 – 3 с.
34. Пат. України № 59981, МПК 2011.01 В01J8/00, В01J8/24. Газорозподільний пристрій для апаратів з псевдозрідженим шаром // В. М. Олійник, В. М. Москалик. – № u201013022; Заявл. 02.11.2010; Опубл. 10.06.2011. Бюл. № 11. – 5 с.
35. Шишмарев В.Ю. Средства измерений. Учебник для студ. сред, проф. учеб. заведений. – М.: Академия, 2009. – 320 с.
36. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
37. Френкель М. И. Поршневые компрессоры. – М.-Л.: Машгиз, 1960.

# ДОДАТОК

## Апарат з псевдозрідженим шаром. Вид загальний

187.015.00.000 ВЗ

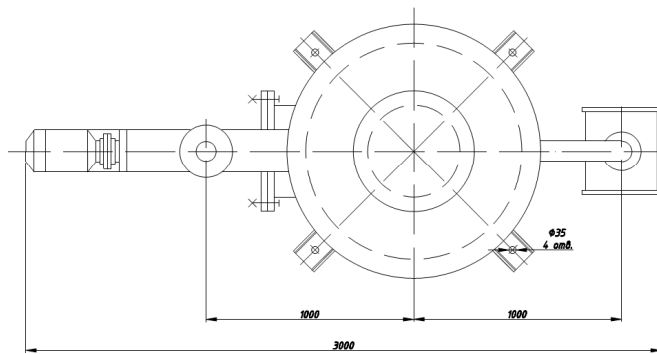


### ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

- При виготовленні апарату керуватися вимогами:
  - ГОСТ 12.2.003-74 "Оборудование производственное. Общие требования и безопасность".
  - ОСТ 26.291-79 "Сосуды и аппараты стальные сварные. Технические требования".
- Матеріал деталей апарату, які стикаються з агресивним середовищем - сталь 20 ГОСТ 1050-89, інших - сталь Ст 3сп ГОСТ 380-94.
- Зварні з'єднання повинні відповідати вимогам ОСТ 26-01-82-77 "Сварка в хімічному машинобудуванні".
- Невизначені шпигера - 150 мм.

### ТАБЛИЦЯ ШТУЦЕРІВ

Позн.	Найменування	Кільк. шт.	Промірний діаметр Ду, мм	Тиск робочий Р <sub>р</sub> , МПа
Г	Вхід гарячого повітря	1	400	0,1
Д	Вихід вологого повітря	1	400	0,1
Е	Вхід вологого повітря	1	100	0,1
Ж	Вихід висушеного матеріалу	1	100	0,1



Поз.	Позначення	Найменування	Кільк. 1 шт.	Найменування та марка матеріалу	Примітка
		Спеціальні одиниці			
1		Завантажувальний пристрій	1		
2		Розвантажувальний пристрій	1		
3		Корпус	1		
4		Днище	1		
5		Кришка	1		
6		Розподільник	1		
		Стандартні вироби			
7		Прокладка			
8		ОСТ 26-430-79 Болт М20х105-В.8	2		
		ГОСТ 7798-70	72		
9		Гайка М20-ВН.5			
		ГОСТ 5915-70	72		
10		Шайба 20 ГОСТ 11971-68	72		
11		Шпилька М16-В8			
		ГОСТ 22032-76	5		
12		Азбестовий шнур			

Лист загальний

Сторінка №

Лист № 1 / Листів 2

187.015.00.000 ВЗ

Знак	Лист	Вказівка	Підпис	Дата	Листів	Маса	Масштаб
		Сумарка з псевдозрідженим шаром			1 : 10		
	Лист 1	Листів 2					
		СНУ ім.В.Дала кафедр МОПТ					

# ДОДАТОК

## Апарат з псевдозрідженим шаром. Вид загальний (продовження)

