

ЗМІСТ

Основні умовні позначення.....	3
Вступ.....	5
1. Аналітичний огляд.....	8
1.1. Загальні положення та визначення.....	8
1.2. Опір тиску у псевдозрідженому шарі.....	14
1.3. Швидкість початку псевдозрідження.....	17
1.4. Розширення псевдозрідженого шару. Якість псевдозрідження.....	23
1.5. Межа існування псевдозрідженого шару.....	27
1.6. Процеси сушіння.....	28
1.7. Газорозподільна решітка для апаратів киплячого шару за патентом SU № 940829.....	36
1.8. Аеродинаміка напірних систем.....	39
1.9. Опір при течії по прямим трубам.....	41
1.10. Опір при течії на вході в труби.....	42
1.11. Опір при перетиканії потоку через діафрагму.....	43
1.12. Опір при течії на виході з труб.....	44
2. Нова сушарка з псевдозрідженим шаром.....	46
3. Експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору короткого дифузора діаметром 10 мм.....	51
3.1. Схема експериментальної установки.....	51
3.2. Техніка експерименту та метод дослідження.....	54
3.3. Прибори та вимірювальна техніка.....	54
3.4. Експериментальне визначення коефіцієнту гідравлічного тертя порожнистого патрубка.....	59
3.5. Експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору діафрагми діаметром 10 мм.....	64
3.6. Експериментальне визначення коефіцієнту гідравлічного опору короткого дифузора діаметром 10 мм.....	69
4. Узагальнення результатів дослідження.....	75
Висновки.....	84
Перелік посилань.....	85
Додатки.....	89
Додаток А – Схема експериментальної установки.....	89
Додаток В – Експериментальний блок.....	90
Додаток С – Досліджувані елементи.....	91
Додаток D – Сушарка з псевдозрідженим шаром.....	92

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему

“Дослідження вузла рівномірного розподілу газу з розробкою сушарки з псевдозрідженим шаром”

Листів – 92, ілюстрацій – 44, таблиць – 11, додатків – 4, посилань – 53.

У даній дипломній роботі представлена нова сушарка з псевдозрідженим шаром з розподільником пари (газу). Для розрахунку вузла, проведено експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору короткого дифузора.

Об’єкт дослідження – течія з раптовою зміною величини швидкості та перетікання потоку через короткий дифузор.

Метою дипломної роботи є експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору коротких дифузоров, що вмонтовані в короткий патрубок з подальшим прогнозуванням коефіцієнта гідравлічного опору інших типорозмірів коротких дифузоров.

Методи дослідження та апаратура. Експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору проводили статичним методом на спеціально розробленій експериментальній установці. Робочою середою в установці було повітря, подачу якої здійснювали поршневым компресором. Замір гідравлічного опору елементів дослідження проводили за допомогою диференційного манометра, а контроль об’ємної витрати повітря здійснювали ротаметром. Статистичну обробку експериментальних даних вели у програмній оболонці MathCad.

Новизна роботи – вперше експериментально одержані коефіцієнти гідравлічного опору коротких дифузоров та намічені шляхи подальшого прогнозування коефіцієнтів гідравлічного опору інших типорозмірів дифузоров з метою проектування розподільника сушарки з псевдозрідженим шаром.

Ключові слова: КОРОТКИЙ ДИФУЗОР, СУШАРКА З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ, КОЕФІЦІЄНТ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ, ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ МАНОМЕТР, РОТАМЕТР.

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

a – прискорення, яке протидіє псевдозрідженню, м/с^2 .

d_i – діаметр вузької фракції суміші, м.

d_9 – еквівалентний діаметр частинок, м.

f_c – площа поперечного перерізу шару, м^2 .

f_m – коефіцієнт гідравлічного опору.

G – вагова швидкість зріджуючого агента.

G'_0 – величина G в момент початку псевдозрідження.

g – прискорення сили тяжіння, м/с^2 .

H – висота нерухомого шару, м.

M_T – маса твердого матеріалу в шарі, кг.

M_9 – ефективна маса твердого матеріалу, кг.

P – тиск в псевдозрідженому шарі, Па.

ΔP – перепад тиску, Па.

ΔP_H – перепад тиску в нерухомому шарі, Па.

ΔP_{II} – перепад тиску в псевдозрідженому шарі, Па.

ΔP_P – опір розподільної решітки, Па.

U – безрозмірна швидкість.

V – об'єм псевдозрідженого шару, м^3 .

V_H – об'єм нерухомого шару, м^3 .

ω – швидкість зріджуючого агента, рад/с.

ω_v – швидкість витання часток, рад/с.

ω_n – швидкість повного псевдозрідження, рад/с.

ω'_0 – швидкість початку псевдозрідження, рад/с.

ω''_0 – швидкість виносу, рад/с.

Γ_{\max} – граничне відношення питомих ваг частинок в псевдозрідженому шарі.

γ – питома вага зріджуючого агента, Н/м^3 .

γ_T – питома вага твердого матеріалу, Н/м^3 .

γ_9 – ефективна питома вага твердого матеріалу, Н/м^3 .

ζ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Δ_i - частка частинок фракції розміру d_i .

ε – порозність псевдозрідженого шару, с/м.

ε_0 – порозність в нерухомому шар, с/м.

μ – динамічна в'язкість зріджуючого агента, Па*с.

ν – кінематична в'язкість зріджуючого агента, м²/с.

Δp_0 – пік тиску.

Φ_s – фактор форми.

ψ – коефіцієнт форми.

ВСТУП

Псевдозрідження є одним з найбільш прогресивних методів здійснення гетерогенних технологічних процесів з твердою фазою. В останні роки цей метод отримав досить широке поширення в хімічній, нафтопереробній, гірничорудної, металургійної, будівельної, харчової та інших галузях промисловості, що обумовлено рядом його безсумнівних переваг. Поряд з впровадженням в промислову практику проводяться великі дослідження з вивчення загальних закономірностей псевдозрідженого стану і окремих особливостей конкретних процесів; одночасно розробляються принципи апаратурного оформлення технологічних процесів в псевдозрідженому шарі.

Відповідно до стандарту виготовлення сушарки з псевдозрідженим шаром в нижній частині апарата передбачається боковий ввід пари, що спричиняє до нерівності потоку пари у поперечному перерізі сушарки. Ця обставина призводить до суттєвого зниження сушіння. Для забезпечення ефективного сушіння подають більше пари, а це призводить до збільшення витрат.

Таким чином, задача розробки сушарки з псевдозрідженим шаром, в якій забезпечиться рівний профіль пари у поперечному перерізі сушарки, є **актуальною**, що і вирішило напрямом дипломної роботи.

В основі дипломної роботи покладена ідея **патенту України № 78789** “Пристрій для однорідного розподілу пари (газу)” одержаного на кафедрі машинознавства та обладнання промислових підприємств Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Сутність ідеї рівного розподілу потоку газу (пари) у поперечному перерізі сушарки полягає в тому, що пристрій являє собою будову з вертикально вмонтованими патрубками в середині яких розміщені дифузори зі зменшеними по потоку вхідними отворами, твірні яких створюють конфузори. При набіганні потоку у патрубків в ньому здійснюється саморегульоване стиснення перерізу потоку за рахунок зворотнього струму, що дозволяє розподілити загальний потік рівно у кожний

патрубок. У цілому початковий неоднорідний потік пари (газу) завдяки новому розподільнику сформує рівний профіль швидкості у поперечному перерізі апарата.

Метою дипломної роботи є експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору коротких дифузорів, що вмонтовані в короткий патрубок з подальшим прогнозуванням коефіцієнта гідравлічного опору інших типорозмірів коротких дифузорів.

Для досягнення мети поставлені наступні **задачі**:

- провести літературний огляд процесу сушіння в псевдозрідженому шарі, конструкцій сушарок і конструкцій вводу пари у сушарку з метою виявлення негативних наслідків нерівномірності потоку на ефективність роботи сушарки можливістю створення у сушарці нового розподільника пари;

- розробити схему експериментальної установки та конструкцію експериментального блоку, а також методику постановки і обробки експерименту для дослідження коефіцієнту гідравлічного опору коротких дифузорів, що вмонтовані у короткі патрубки;

- виконати експериментальні підготовчі роботи з метою визначення достовірності подальших результатів експериментів, порівнявши експериментальні коефіцієнти гідравлічних опорів діафрагм з теоретично визначеними за літературними джерелами;

- експериментально одержати коефіцієнти гідравлічного опору коротких дифузорів, що вмонтовані у короткі патрубки;

- провести порівнювальний аналіз одержаних результатів з метою подальшого прогнозування коефіцієнтів опорів інших типорозмірів коротких дифузорів, що вмонтовані у короткі патрубки.

Методи дослідження. Експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору проводили статичним методом на спеціально розробленій експериментальній установці кафедри машинознавства та обладнання промислових підприємств. Робочою середою в установці було повітря, подачу якої здійснювали поршнеvim компресором. Замір гідравлічного опору елементів дослідження проводили за допомогою диференційного манометра, а

контроль об'ємної витрати повітря здійснювали ротаметром. Статистичну обробку експериментальних даних вели методом регресивного аналізу за допомогою самостійно розробленому алгоритму у програмній оболонці MathCad.

Об'єкт дослідження – течія з раптовою зміною величини швидкості та перетікання потоку через короткий дифузор.

Предмет дослідження – коефіцієнт гідравлічного опору розподільника сушилки з псевдозрідженим шаром.

Практична значимість отриманих результатів для хімічній насуміжних галузях промисловості полягає у створенні перспективної сушилки в псевдозрідженому шарі підвищеної ефективності. Результати представляють інтерес для інженерів-конструкторів, науково-дослідних та проектних організацій, пов'язаних з конструюванням нових та реконструкцією діючих сушарок з псевдозрідженим шаром.

Новизна роботи – вперше експериментально одержані коефіцієнти гідравлічного опору коротких дифузорів та намічені шляхи подальшого прогнозування коефіцієнтів гідравлічного опору інших типорозмірів дифузорів з метою проектування розподільника сушарки з псевдозрідженим шаром.

Публікації. За темою дипломної роботи опубліковано 2 наукові роботи, серед них патент України № 78789 та тези доповіді на ХІХ міжнародній науково-технічній конференції «Технологія - 2017».

Структура та обсяг дипломної роботи. Дипломна робота складається з завдання, реферату, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дипломної роботи становить 92 сторінки, з них 44 рисунків за текстом, 11 таблиць, списку використаних джерел з 53 найменувань на 4 сторінках, а також додатків на 4 сторінках з зображенням схеми експериментальної установки, загального виду експериментального блоку, рисунку елементів дослідження (діафрагм та дифузорів) та загального виду сушарки з псевдозрідженим шаром.

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1. Загальні положення та визначення

Псевдозрідженим називають стан двофазної системи (тверді частинки - газ або рідина), яке характеризується переміщенням твердих частинок один щодо одного за рахунок обміну енергією з будь-яким її джерелом. Під псевдозріджених розуміють перетворення шару зернистого матеріалу в псевдогомогенну систему під впливом зріджуючого агента (газу або крапельної рідини). При цьому сама двухфазна псевдогомогенна система отримала назву псевдозрідженого (або киплячого) шару. Свою назву псевдозріджений шар отримав завдяки тому, що йому притаманні багато властивостей крапельних рідин.

На практиці псевдозріджений шар утворюється при висхідному русі зріджуючого агента через шар зернистого матеріалу в момент, коли перепад тиску в шарі досягає величини, достатньої для підтримки зернистого матеріалу в підвішеному стані.

Утворення псевдозрідженого шару можна, в найпростішому випадку, уявити собі таким чином (рис. 1.1). У вертикальну посудину 1 будь-якої (наприклад, циліндричної) форми, забезпечений поперечним газопроникним підтримуючим пристроєм 2 у вигляді сітки, пористої перегородки і т. п., поміщений шар дрібнозернистого твердого матеріалу 3. При подачі через пристрій 2, зване надалі розподільною решіткою, 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 отримують можливість взаємного контролю пульсаційного переміщення, тобто шар 3 стане «текучим» і придбає 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.

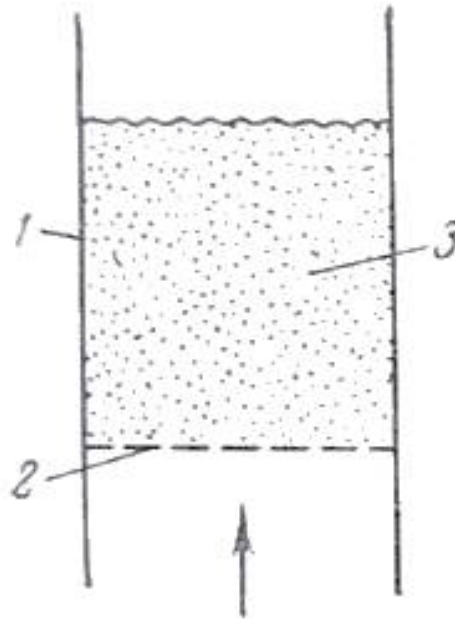


Рис. 1.1 – Схема апарату

Швидкість газу (рідини), при якій нерухомий шар зернистого матеріалу переходить в псевдозріджений стан, називається швидкістю початку псевдозрідження (або першої критичної). Швидкість газу, при якій тверді частинки виносяться з шару, називається швидкістю винесення (або другої критичної). Таким чином, діапазон псевдозрідження обмежен першої і другої критичними швидкостями. При відносній об'ємній концентрації твердої фази в псевдозрідженому шарі не нижче $0,3$ говорять про псевдозрідження в щільній фазі, а при концентрації нижче $0,3$ - про псевдозрідження в розведеної фазі.

Зернистий матеріал для псевдозрідження може бути завантажений в апарат одноразово (періодичне псевдозрідження), або може безперервно вводитися і виводитися з апарату (безперервне псевдозрідження).

Якщо швидкість зріджуючого агента (газу або рідини) незначно перевищує швидкість початку псевдозрідження, то рух частинок виражено слабо - шар знаходиться в стані спокійного псевдозрідження.

Зі збільшенням швидкості газу в шарі починають з'являтися невеликі газові бульбашки, що підвищують інтенсивність перемішування частинок. Вільна поверхня шару в цьому випадку окреслена досить різко, відчуваючи

порівняно невеликі коливання. Такий шар отримав назву власне киплячого шару.

Якщо ж зріджуючим агентом є крапельна рідина, а не газ, то після спокійного псевдозрідження шар поступово розширюється аж до розмивання вільної поверхні і виносу частинок. На схемі, складеній П. Ребу [1] (рис. 1.2), представлені фази розвитку псевдозрідженого шару.

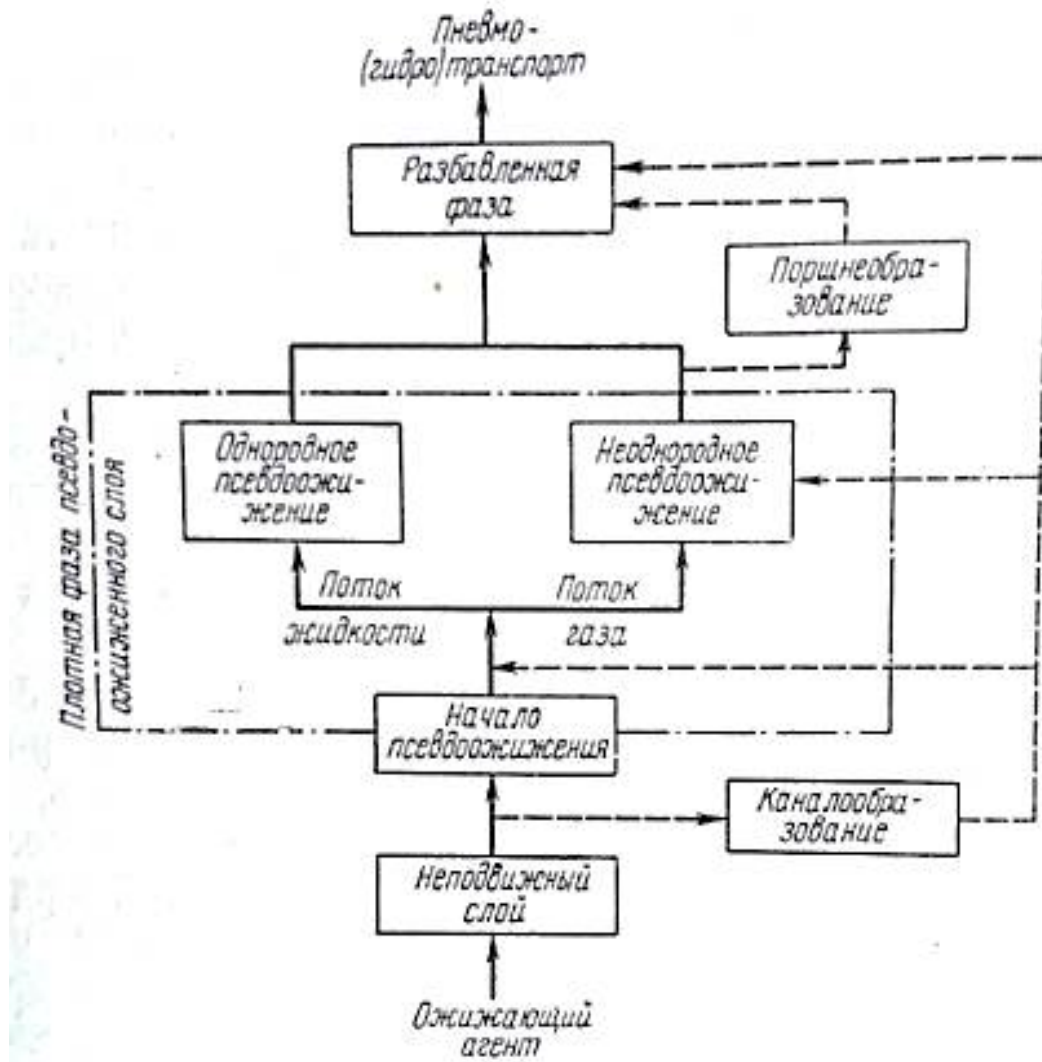


Рис. 1.2 – Схема виникнення і розвитку псевдозрідженого шару

Своєрідний характер носить псевдозрідження в кінцевих і кінчно-циліндричних апаратах при незначних діаметрах і досить великих кутах в вершині конуса (рис. 1.3). У таких апаратах можливе утворення фонтануючого шару [2, 3, 4], коли зріджуючий агент, проходячи переважно по осі апарату, захоплює тверді частинки і фонтаном викидає їх вгору до периферії, після чого частки уздовж бічної поверхні конуса сповзають вниз. Така псевдозріджена

система характеризується малою рівномірністю в горизонтальних перетинах шару.



Рис. 1.3 – Фонтануючий шар

Псевдозрідження зернистого матеріалу можливо не тільки в полі сил тяжіння, але також в полі магнітних [5] або відцентрових [6, 7, 8, 9] сил. В останньому випадку різко зростають швидкості початку псевдозрідження і виносу, так як відцентрові сили, що врівноважують силу гідродинамічного опору, можуть в сотні разів перевищувати силу тяжіння. При цьому в результаті збільшення швидкості зріджуючого агента зростає не тільки продуктивність апарату, а й інтенсивність дифузійних і теплових процесів.

Псевдозрідження зернистих матеріалів можливо не тільки шляхом продування шару потоком газу або крапельної рідини, але також за допомогою будь-якого механічного спонукача, наприклад лопастній мішалки [10, 11] або вібратора (механічне псевдозрідження). У таких системах тверді частинки можуть інтенсивно переміщатися в шарі, який володіє багатьма властивостями, характерними для псевдозрідження газами (пневматичне псевдозрідження) і крапельними рідинами (гідралічне псевдозрідження), наприклад плинністю, збільшенням обсягу і ін. Не торкаючись специфічних особливостей

механічного псевдозрідження, зауважу лише, що одним з його переваг є можливість здійснення процесів у вакуумі.

Стан двухфазної системи стосовно псевдозрідженого шару наочно зображується у вигляді кривої псевдозрідження. Остання висловлює залежність повного перепаду тиску ΔP від швидкості зріджуючого агента ω в незаповненому перетині апарату.

На рис. 1.4 зображена крива ідеального псевдозрідження монодисперсного шару в апараті з постійним поперечним перерізом по його висоті.

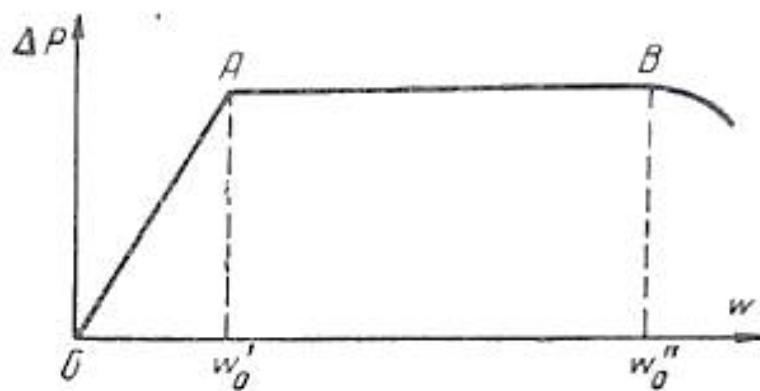


Рис. 1.4 – Крива ідеального псевдозрідження

Висхідна гілка кривої (OA) відповідає руху зріджуючого агента через нерухомий шар, і вид її визначається режимом руху газу (рідини). У разі малого розміру часток, що складають шар, і низьких значень швидкостей режим руху газу до моменту псевдозрідження зазвичай є ламінарним і гілка прямолінійна. Для псевдозрідженого шару великих, (важких) частинок можуть, знадобитися значні швидкості, і тоді відповідно до закономірностей перехідного або турбулентного режимів руху гілка OA стає криволінійною.

Злам кривої в точці A відповідає переходу нерухомого шару в псевдозріджений стан, а абсциса точки A висловлює швидкість початку псевдозрідження ω'_0 , що є нижньою межею діапазону псевдозрідженого стану. Величину ω'_0 часто називають першою критичною швидкістю. З моменту початку псевдозрідження сили гідродинамічного тиску газового (рідинного) потоку врівноважують вагу твердих частинок в шарі. Так як ця вага з

подальшим зростанням швидкості газу ω залишається незмінною, то не змінюється також витрата енергії на підтримку частинок в підвішеному стані. Цей стан відбивається на рис. 1.4 горизонтальною ділянкою AB . Точка B , абсциса якою висловлює швидкість початку виносу частинок ω''_0 (друга критична швидкість), є верхньою межею псевдозріджуючого стану. При швидкостях зріджуючого агента $\omega > \omega''_0$ частинки виносяться з шару, їх вагова кількість в шарі падає; в результаті зменшується енергія, необхідна для підтримки твердої фази в підвішеному стані. З цієї причини перепад тиску правіше точки B знижується.

Дійсна крива псевдозрідження дещо відрізняється від ідеальної. Перш за все для реальної кривої псевдозрідження (рис. 1.5) характерна наявність піку тиску Δp_0 в момент переходу шару в псевдозріджений стан, що пояснюється необхідністю додаткової витрати енергії на подолання сил зчеплення частинок. Величина піку тиску, при інших рівних умовах, залежить від форми і стану поверхні частинок.

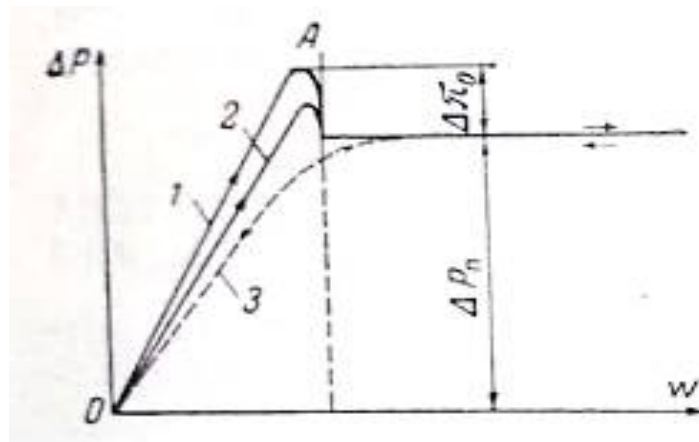


Рис. 1.5 – Реальні криві псевдозрідження

Висхідна гілка OA в реальних умовах, як правило, не відтворюється, так як перепад тиску в нерухомому шарі ΔP_n залежить від щільності первісної упаковки частинок. Вутрабованому шарі гілка OA піднімається крутіше (лінія 1), ніж при більш пухкій упаковці (лінія 2). Величина піку тиску Δp_0 в першому випадку більше, ніж у другому.

Реальна крива псевдозрідження виявляє гистерезис: так звані лінії прямого і зворотнього ходу (отримані відповідно при поступовому збільшенні і поступовому зменшенні швидкості газу) поблизу точки A не збігаються, причому на другій з цих ліній відсутній пік тиску і вона, як правило, розташовується нижче першої. Ділянка кривої зворотнього ходу лівіше точки A відповідає найбільш пухкої упаковці частинок, можливої для нерухомого шару. При віддаленні вправо від точки A криві прямого і зворотнього ходу зближуються і при досить інтенсивному псевдозрідженні збігаються. Слід зазначити, що криві зворотнього ходу добре відтворюються від досліду до досліду.

Нарешті, в реальних умовах ділянка AB (рис. 1.4) часто не є строго горизонтальною, виявляючи монотонне зростання ΔP до свого постійного значення [2], а іноді і наступні коливання біля цього значення [12, 13].

1.2. Перепад тиску у псевдозрідженому шарі

Для підтримки в псевдозрідженому стані шару твердих частинок потрібно безперервний обмін енергією між ними і зріджуючим агентом. Енергія, що віддається зріджуючим агентом, витрачається на подолання тертя часток одна об одну і газу об їх поверхню, на зміну кінетичної енергії газу і розширення шару, а також на тертя частинок і газу об стінки апарату. Перераховані складові сумарної витрати енергії не рівноцінні: мабуть, найбільшою є витрата енергії на подолання тертя газу об поверхню частинок. Сумарна витрата енергії в одиницю часу становить:

$$E = \int_P \omega f_c dP \quad (1.1)$$

де dP — перепад тиску на елементарній ділянці в напрямку руху зріджуючого агента;

f_c —площа поперечного перерізу шару.

В окремому випадку для апаратів постійного поперечного перерізу, якщо знехтувати стискувальністю зріджуючого агента, отримаємо:

$$E = \omega f_c \Delta P_n \quad (1.2)$$

де ΔP_{II} — перепад тиску при русі газу (рідини) через псевдозріджений шар, тобто гідравлічний опір шару.

Величина ΔP_{II} , знання якої необхідно при виборі машин для подачі зріджуючого агента в систему з псевдозрідженим шаром, може бути досить точно визначена теоретичним шляхом. Для цього в найзагальнішому випадку (рис. 1.6) досить скористатися умовою рівності сили гідродинамічного тиску і сили, протидіючій псевдозріджених частинок. Перша з цих сил на елементарній ділянці висоти шару dz дорівнює $-f_c dP$, а друга виражається множенням елементарної маси $dM_{\text{Э}}$ в об'ємі $dV = f_c dz$ на прискорення a протидіючій сили.

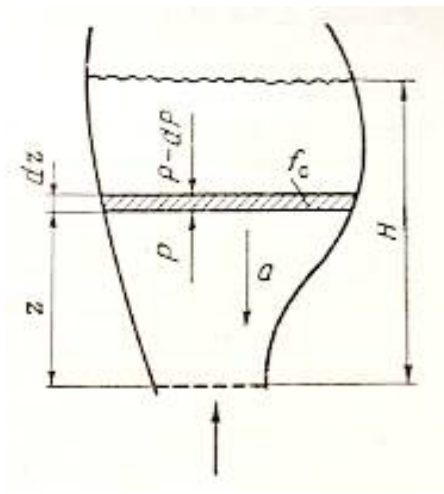


Рис. 1.6— До висновку загального рівняння для розрахунку перепаду тиску в псевдозрідженому шарі

З рівності розглянутих сил слідує:

$$-f_c dP = a dM_{\text{Э}}$$

Звідки

$$\Delta P_{II} = \int_{M_{\text{Э}}} \frac{a}{f_c} dM_{\text{Э}} \quad (1.3)$$

Тут $M_{\text{Э}} = M_T - M_0$ — ефективна маса псевдозріджуючого твердого матеріалу (з урахуванням архімедівських сил), причому M_T і M_0 — відповідно маса твердого матеріалу і зріджуючого агента в об'ємі цього матеріалу.

$$\Delta P_{\Pi} \approx \int_{M_T} \frac{a}{f_c} dM_T \quad (1.4)$$

Користуючись виразом (1.3), можна отримати розрахункові формули для ΔP_{Π} стосовно до різних випадків псевдозрідження.

В даний час використовуються два методи експериментальної побудови кривих псевдозрідження - прямий і непрямий (рис. 1.7). За першим методом імпульсні трубки для вимірювання опору шару ΔP_C розташовуються біля його утворення (над розподільною решіткою) і над вільною поверхнею, величина ΔP_C відраховується за шкалою U-подібного манометра *IA*. За другим методом нижня імпульсна трубка розташовується під розподільною решіткою, тому манометр *IB* показує сумарний опір решітки і шару ΔP_{p+c} . Віднімаючи з цієї величини опір решітки за відсутності шару, отримують перепад тиску в псевдозрідженому шарі $\Delta P'_C$.

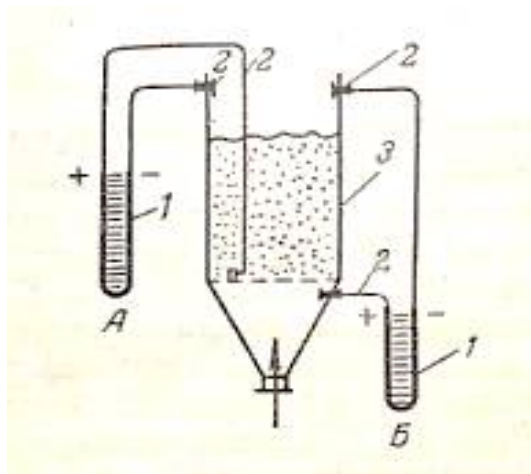


Рис. 1.7– До методики визначення перепаду тиску в шарі (А - схема прямого визначення; Б - схема непрямого визначення)

Слід мати на увазі, що обидва викладених методи зовсім не ідентичні, так як опір решітки ΔP_p в робочих умовах (тобто з шаром дрібнозернистого матеріалу над нею) і під час відсутності сипучого матеріалу ($\Delta P'_p$) - різні ($\Delta P_p \neq \Delta P'_p$). Непряме визначення опору шару є свідомо помилковим.

Різниця в величинах ΔP_p і $\Delta P'_p$ може бути викликано різними причинами. Рівномірність розподілу зріджуючого агента по перетину шару зростає зі збільшенням опору системи [14], тому вона повинна зростати при наявності і

по мірі збільшення висоти псевдозрідженого шару зернистого матеріалу. Опір же самої решітки зменшується з поліпшенням рівномірності розподілу потоку, тобто в присутності шару і з ростом його висоти.

У ряді випадків наявність шару зернистого матеріалу може привести, навпаки, до збільшення опору решітки в результаті часткового її закупорювання псевдозрідженим матеріалом або дрібними частинками, що утворюється внаслідок ерозії. З плином часу гідравлічний опір решіток часто змінюється. Крім того, для псевдозрідженого шару характерно існування малорухомих (застійних) зон зернистого матеріалу, що виникають не тільки через невдалу конструкцію апарату. Справа в тому, що на практиці в ядрі псевдозрідженого шару часто спостерігаються висхідні потоки зі зниженою концентрацією твердої фази, а на периферії шару - низхідні потоки з концентрацією, близькою до величин, характерних для нерухомого шару [2, 15]. Цілком очевидно, що в цьому випадку основна маса зріджуючого агента проходить через окремі ділянки решітки, викликаючи зростання її гідравлічного опору в присутності шару. Нарешті, до такого ж ефекту може призвести навіть незначне (на 1 - 2 градуси) відхилення решітки від горизонтального положення.

Природно, що дія хоча б одного з перерахованих факторів призводить до спотворення кривої псевдозрідження при непрямої її визначенні.

Найбільша похибка при непрямої визначенні опору шару, відповідно до теорії помилок, спостерігається при малих різницях $\Delta P_{p+c} - \Delta P'_p$, тобто при відносно великому опорі розподільної решітки або малому опорі псевдозрідженого шару, наприклад, внаслідок малої різниці $\gamma_T - \gamma$.

Таким чином, істинний перепад тиску в псевдозрідженому шарі можна вимірювати лише прямим методом.

1.3. Швидкість початку псевдозрідження

Швидкість зріджуючого агента ω'_0 в початковий момент псевдозрідження шару зернистого матеріалу (коротко - швидкість початку псевдозрідження) є важливою характеристикою цього матеріалу.

В даний час склалися два підходи до визначення швидкості початку псевдозрідження. По першому з них приймають: за початок псевдозрідження момент, коли гідравлічний опір потоку зріджуючого агента врівноважується вагою псевдозріджуючого зернистого матеріалу. Другий підхід до вирішення даної задачі базується на взаємозв'язку між швидкістю витання часток (ω_g) і швидкістю початку псевдозрідження. Обидва ці параметри висловлюють граничні точки псевдозрідженого стану шару зернистого матеріалу, характерного рівністю сил гідродинамічного тиску і ваги. У зв'язку з цим пропонується визначати швидкість початку псевдозрідження ω'_0 , базуючись на швидкості витання одиночної частинки ω_g .

Перший підхід до розрахункового визначення величини найбільш докладно розроблений М. Лева [2] і О. М. Тодес з співр. [16], виходячи з таких міркувань. Питомий опір нерухомого шару зернистого матеріалу ϵ , за інших рівних умов, функцією швидкості газу:

$$(1.5)$$

У точці початку псевдозрідження:

$$(1.6)$$

Прирівнюючи вирази (1.5) і (1.6), отримують рівняння, яке в неявній формі щодо ω'_0 має такий вигляд:

$$f(\omega'_0) = \gamma_{\text{в}}(1 - \epsilon_0) \quad (1.7)$$

Різниця в формулах, отриманих Лева [2] і Тодес з співр. [16] стосовно до апаратів з незмінною площею поперечного перерізу, пояснюється наступним.

Перший з цих авторів застосував відоме рівняння для розрахунку опору зернистого шару (використавши для розрахунку визначального лінійного розміру формулу Козені):

$$\Delta P$$

$$(1.8)$$

де $G'_0 = \omega'_0 \gamma$ – вагова швидкість початку псевдозрідження;

f_m – коефіцієнт гідравлічного опору, що залежить від режиму руху, що

визначається значенням критерію $Re'_0 = \frac{G'_0 d_3}{\mu g}$;

n – показник ступеня, рівний для ламінарного режиму 1, а для розвиненого турбулентного режиму наближається до 2.

З рівняння (1.8) знаходимо:

$$(G'_0)^2 = \frac{d_3 \gamma_3 \varepsilon_0^3 \Phi_s^{3-n} \gamma g}{2 f_m (1 - \varepsilon_0)^{2-n}} \quad (1.9)$$

При ламінарному режимі формула (1.9), з урахуванням $n=1$ і $f_m=100/Re$, після підстановки замість Re його значення набуває вигляду:

$$G'_0 = \frac{0,005 d_3^2 \Phi_s^2 \gamma_3 \gamma \varepsilon_0^3}{\mu (1 - \varepsilon_0)} \quad (1.10)$$

Лінійну швидкість початку псевдозрідження можна знайти діленням G'_0 на питому вагу зріджуючого агента γ .

Другий підхід до визначення швидкості початку псевдозрідження знайшов найбільш завершене вираження в роботах Я. Беранека і Д. Сокола [15]. Автори наводять такі співвідношення, що базуються на швидкості витання ω_e : для ламінарного режиму ($B_0 < 0,3$)

$$\omega'_0 / \omega_B = 0,019 \pm 0,003 \quad (1.11)$$

для перехідної області

$$(1.12)$$

для турбулентного режиму ($B_0 > 10^3$)

$$\omega'_0 / \omega_B = 0,090 \pm 0,005 \quad (1.13)$$

$$B = \frac{G'_0 d_3}{\mu g \gamma}$$

де критерій вільного падіння для сферичних частинок.

Вирази (1.11) - (1.13) можна застосувати й для частинок довільної форми, якщо ввести критерій B , що відрізняється від B_0 коефіцієнтом форми ψ . Величина B_0 є однозначною функцією критерія:

$$(1.14)$$

причому $Ar_1 = \frac{gZ}{v^2\gamma}$, Z – ефективна вага однієї частинки, K і n залежать від режиму руху. Зауважимо, що $Ar_1 = \frac{\pi}{6} Ar$.

Для ламінарного режиму ($Ar_1 < 4$) $K = 6,49 \cdot 10^{-4}$ і $n = 1/2$; для розвиненого турбулентного ($Ar_1 > 10^{1.5}$) $K = 22,1$ і $n = 2,0$.

З цими значеннями K і n отримуємо:

для ламінарного режиму

$$B_0 = 1,781 \cdot 10^{-4} Ar^2 \quad (1.15)$$

для турбулентного

$$B_0 = 16,0 Ar^{1/2} \quad (1.16)$$

Слід зазначити, що швидкість початку псевдозрідження не є в точності відтворюємою, оскільки вона залежить від щільності упаковки частинок. Цим же пояснюється той факт, що криві псевдозрідження прямого ходу погано відтворювані, а криві зворотнього ходу відтворюються добре. Швидкість початку псевдозрідження, знайдена по кривим зворотнього ходу (як абсциса точки перетину горизонтальної лінії постійного перепаду тиску з кривою опору нерухомого шару), має стабільні значення, які не залежать від попереднього стану шару, і природно, перевищує величину ω'_0 , отриману на основі кривої прямого ходу. У зв'язку з цим видається цікавим порівняти значення ω'_0 , знайдені по кривим прямого і зворотнього ходу. Таке зіставлення при псевдозрідженні повітрям частинок кварцового піску різного розміру дано в порівнянні зі значеннями ω'_0 (в см / сек), розрахованими за формулами Лева, Тодеса і Беранека (табл. 1.1):

Таблиця 1.1_Кварцевий пісок різного розміру при псевдозрідженні

Експериментальні дані:	розмір частинок, мм		
прямий хід	0,164	0,263	0,352
зворотній хід	2,7	6,0	10,7
Розрахункові значення:	3,5	8,0	13,4
по Лева	2,9	6,8	11,5
по Тодесу с сотр.	2,5	6,1	10,2
по Беранеку та Соколу	3,3	8,5	13,6

З наведених даних видно, що експериментальні значення знайдені по кривій прямого ходу, задовільно узгоджуються з розрахованими за формулами Лева і Тодеса, а знайдені по кривій зворотнього ходу – з обчисленими за методом Беранека і Сокола. Цим пояснюється спостережувальна розбіжність значень ω'_0 , обчислених по запропонованих формулах. Між іншим, подібно П. Ребу [1], Я. Беранек і Д. Сокол [15] рекомендують приймати за швидкість початку псевдозрідження величину, отриману на основі саме кривої зворотнього ходу. На користь цієї рекомендації говорить та обставина, що величина визначена за формулами Лева і Тодеса, що базується на лабораторних дослідах, виявляється дещо заниженою стосовно промислових апаратів з великим поперечним перерізом.

Підвищення тиску в помірних межах (до 15 ат), як показує досвід [17, 18, 19], не впливає на величину ω'_0 в області ламінарного режиму. Цей висновок цілком узгоджується з формулою (1.10), вираженою для вагової швидкості початку псевдозрідження. В області перехідного і турбулентного режимів ω'_0 зменшується з підвищенням тиску [18, 19, 20].

Розміщення в шарі будь-яких перегородок, теплообмінних елементів і т.п. Надає певний вплив на швидкість початку псевдозрідження. Так, наприклад, при зануренні всередину шару вертикальних пучків труб швидкість початку псевдозрідження, віднесена до площі перетину, що не зайнята трубами, зростає при переході від пучків з рідкісним розташуванням труб до більш щільним [13].

У разі полідисперсного шару спочатку в псевдозріджений стан переходять дрібні частинки, потім більші. На кривій псевдозрідження такий поступовий перехід шару в псевдозріджений стан відбивається плавною зміною

величини опору шару. Значення ω_n визначається не тільки розміром великих часток в шарі, а й його гранулометричним складом. Справа в тому, що дрібні частинки, що перейшли в псевдозріджений стан, сприяють псевдозрідженню більших частинок за рахунок обміну кількістю руху внаслідок зіткнення. З цієї причини в полідисперсному шарі безперервного гранулометричного складу псевдозрідження будь-якої проміжної фракції відбувається при менших значеннях швидкості зріджуючого агента, ніж при окремому псевдозрідженню цієї ж фракції [21, 22, 23]. Відповідно швидкість повного псевдозрідження полідисперсного шару виявляється менше швидкості початку псевдозрідження найбільш великих часток. У зв'язку з цим представляється несправедливим твердження Я. Беранека і Д. Сокола [15] про те, що повне псевдозрідження настає при швидкості зріджуючого агента, відповідної початку псевдозрідження найбільш великих часток.

У разі полідисперсного шару дискретного гранулометричного складу процес псевдозрідження може визначатися і найбільш великими частками, причому він відбувається поступово, так як рух дрібних частинок не може вивести великі частки з нерухомого стану.

Орієнтовна оцінка швидкості початку псевдозрідження полідисперсного шару можлива шляхом підстановки в наведені розрахункові формули середнього розміру часток обчисленого, наприклад, за рівняннями:

$$d_3 = \sqrt{d_1 \cdot d_2} \quad (1.17)$$

$$d_3 = \frac{1}{\sum \frac{\Delta_i}{d_i}} \quad (1.18)$$

Рекомендують також [21 22, 23] визначати величину d_i за формулою:

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{2d_1^2 d_2^2}{d_1 + d_2}} \quad (1.19)$$

яка дає менші чисельні значення d_i ніж формула типу (1.17). Між іншим, сама структура формули (1.18) дещо перебільшує значення великих частинок, оскільки вага їх пропорційна кубу лінійного розміру.

Зауважимо, що швидкості повного псевдозрідження полідисперсного шару, обчислені за формулами Лева і Годеса, є дещо заниженими, зокрема, через применшення ефективного значення d_3 , обчисленого за формулами (1.17) і (1.18). У той же час швидкість початку псевдозрідження, що базується на найбільш великих частинках в суміші [15, 24], виходять завищеними. Істинне значення ω_n , мабуть, лежить між цими крайніми значеннями і розрахунок його повинен базуватися на якомусь середньому розмірі частинки, що залежить не тільки від числа полідисперсності D_c (відношення розмірів найбільшої і найменшої частинок в суміші: $D_c = d_{max} / d_{min}$), але і від всієї кривої гранулометричного складу шару.

Запропоновано розрахункове співвідношення, що враховує модифіковане число полідисперсності $D_{c3} = d_{max} / d_3$ [25]:

$$(1.20)$$

Тут Re_n базується на швидкості повного псевдозрідження ω_n , а d_3 обчислюється за формулами (1.19) і (1.18).

1.4. Розширення псевдозрідженого шару. Якість псевдозрідження

При розрахунку висоти (обсягу) апаратів, призначених для проведення процесів з псевдозрідженим шаром зернистого матеріалу, а також для оцінки інтенсивності тепло- і масообміну необхідно знати обсяг шару в робочому, тобто розширеному, стані. Розширення шару є однією з найважливіших характеристик стану псевдозріджених систем [2, 15, 26, 27 та ін.].

При псевдозрідженні газами зі збільшенням їх швидкості шар послідовно проходить стадії спокійного псевдозрідження (шар відносно однорідний за обсягом) і неоднорідного псевдозрідження - (барботажа бульбашок, утворення агрегатів – шар неоднорідний за обсягом). При подальшому збільшенні швидкості газу, коли порізність ε перевищує 0,7-0,8, шар знову стає однорідним з більш-менш рівномірно розподіленим в ньому твердою фазою (в разі

полідисперсного складу зернистого матеріалу – шар з сепарацією частинок по висоті в залежності від їх розміру). У разі псевдозрідження крапельною рідиною шар поступово розширюється від стану спокійного псевдозрідження до сепарованого шару, як правило, оминаючи стадію утворення неоднорідного шару.

Розширення шару при псевдозрідженні крапельною рідиною, як показано дослідниками [28, 29, 30], описується наступним рівнянням:

$$\frac{\omega}{\omega_B} = \varepsilon^{z_0} \quad (1.21)$$

де показник ступеня z_0 є функцією критеріїв Архімеда [15, 28, 29] або Рейнольдса [2, 27, 30]. Вид функції визначається діапазоном зміни Ar або Re , наприклад [31, 32]:

$$Re = \frac{0,0781 Ar \varepsilon^{4,65}}{(Ar + 19,0)^{0,11}}; Re \leq Re_K \quad (1.22)$$

$$Re = 0,912 Re_B \varepsilon^{z_1}; Re'_0 < Re < 3Re_K \quad (1.23)$$

$$Re = 0,728 Re_B \varepsilon^{z_2}; Re \geq Re_K \quad (1.24)$$

У наведених рівняннях величина Re_B розрахована на основі швидкості витання ω_b , а величина Re_K повинна визначатися за рівнянням:

$$Re_K = \left(\frac{Ar + 34,0}{200} \right)^{0,57z} \quad (1.25)$$

Викладена методика розрахунку дає результати, які добре збігаються з експериментальними даними, але є багатоступеневою і вельми громіздкою при практичному використанні.

Скориставшись співвідношеннями (1.22) - (1.24) і ввівши поняття про відносну безрозмірну швидкість U , вдалося [15] значно спростити метод розрахунку ступеня розширення шару.

Величина $U = \frac{\omega - \omega_b}{\omega_B - \omega_b}$ змінюється в діапазоні псевдозрідженого стану від нуля (в момент початку псевдозрідження) до 1 (при $\varepsilon=1$, коли $\omega=\omega_b$). За допомогою U автори [15] отримали залежність, що описує розширення шару з однакових за розмірами кулеподібних частинок.

Для характеристики розширення шару частинок довільної форми вводиться [15] поняття про відносну порізність шару ε_r , що враховує упаковку частинок в нерухомому шарі, а значить, в якійсь мірі і форму частинок:

$$\varepsilon_r = \frac{V - V_H}{V} = 1 - \frac{V_H}{V} \quad (1.26)$$

де V і V_H – об'єми шару відповідно в робочому і нерухомому станах.

Викладені вище методи розрахунку ступеня розширення псевдозрідженого шару пов'язані з необхідністю попереднього визначення швидкості витання часток. Це дуже просто для частинок сферичної форми, але вимагає постановки спеціального експерименту в разі частинок неправильної форми.

У технологічних процесах з псевдозрідженим шаром, де зріджуючим агентом є гази, псевдозрідження носить більш складний характер, ніж при використанні крапельних рідин; воно супроводжується утворенням агрегатів твердих частинок і газових бульбашок, причини виникнення яких залишаються до кінця невстановленими.

На порізність псевдозрідженого шару впливає розміщення всередині шару теплообмінних елементів, перегородок та інших сторонніх предметів. Так, в присутності вертикального трубного пучка при незмінній витраті газу порізність дещо зростає. Однак при незмінній швидкості в міжтрубному просторі величина порізності зберігає своє значення в присутності пучків труб з кроком від 5 до 2 d_m [13].

Порізність псевдозрідженого шару зернистого матеріалу в полі відцентрових сил швидко збільшується в міру наближення до осі обертання; це чітко видно при візуальних спостереженнях за поведінкою шару [6, 8, 33]. Розширення розглянутого шару (локальне і повне) залежить від ряду одночасно діючих факторів.

Відцентрова сила, що протидіє розширенню шару, зменшується в міру наближення до осі апарату, тому порізність, природно, зростає від периферії до центру. У цьому ж напрямку діє також зміна швидкості газу, яка зростає з наближенням до осі обертання відповідно до зменшення радіуса циліндричних

поверхонь. Нарешті, оскільки перепад тиску в псевдозрідженому шарі в полі відцентрових сил зазвичай досить великий, то з наближенням до осі обертання відбувається додаткове збільшення швидкості газу внаслідок зменшення його тиску.

Для здійснення технологічних процесів в гетерогенних системах з псевдозрідженим шаром зернистого матеріалу потрібне знання не тільки усереднених значень швидкості зріджуючого агента ω і середньої порізності ϵ , але також характеру зміни цих параметрів по висоті і перетину шару і в часі. З локальними і миттєвими значеннями згаданих і деяких інших параметрів псевдозрідженого шару пов'язане поняття про якість псевдозрідження.

В реальних умовах через недостатньо рівномірний розподіл зріджуючого агента деяка частка твердого матеріалу в шарі не переходить в псевдозріджений стан, утворюючи нерухомі, (малорухливі) «застійні» зони. Ці зони, як правило, не бажані, тому що служать джерелами порушення нормального ходу технологічних процесів. Оцінюючи якість розподілу потоку зріджуючого агента і характеризуючи таким чином повноту псевдозрідження зернистого матеріалу, говорять про тій чи іншій мірі рівномірності псевдозрідження. Поряд з цим вводиться поняття про однорідність псевдозрідженого стану, що характеризує закономірність пульсаційних коливань визначальних параметрів системи; в ідеально однорідному шарі пульсації відсутні.

Спільний розгляд однорідності і рівномірності псевдозрідженої системи дозволяє оцінити якість псевдозрідження. При здійсненні технологічних процесів з псевдозрідженим шаром зазвичай прагнуть до найбільшої рівномірності псевдозрідження (виключаючи специфічні випадки, коли нерівномірність закладена в самому принципі даної модифікації псевдозрідженого стану, наприклад при фонтануванні). Ідеальна ж однорідність псевдозрідженого шару зазвичай не є його оптимальним станом, так як при відсутності пульсацій тиску, порізності і швидкості немає інтенсивного перемішування твердого матеріалу, і в певній мірі втрачаються основні переваги псевдозріджених систем. У той же час небажана також і значна неоднорідність псевдозрідження, часто тягне за собою зниження

ступеня перетворення при здійсненні хімічних реакцій (через недостатній контакт газу з твердою фазою і посилення позовжнього перемішування). Велика неоднорідність псевдозрідження веде до зменшення розділової здатності псевдозрідженого шару, часто використовується як «обважнювача», в процесах сухих класифікації твердих матеріалів по їх щільності. Мабуть, існує оптимальна ступінь однорідності, яка визначається вимогами кожного конкретного процесу.

1.5. Межа існування псевдозрідженого шару

Допустиме значення Γ_{\max} дуже велике і співвідношення $\gamma_{\max}/\gamma_{\min}$ практично не може лімітувати процес псевдозрідження. Справа в тому, що на практиці навряд чи можливий такий випадок, коли при однаковому розмірі частинок і допустимому відношенні питомих ваг більше 70 легкі частинки будуть винесені з шару перш, ніж важкі перейдуть в псевдозріджений стан.

Однак відношення питомих ваг може відігравати певну роль при встановленні меж існування псевдозрідженого шару, коли одночасно змінюються і розміри частинок. В цьому випадку характеристика суміші за граничним числом полідисперсності стає недостатньою, так як починає грати роль і розподіл часток за питомими вагами. Більш повною в зв'язку з цим представляється характеристика системи по відношенню граничних значень критерія Архімеда при заданій величині критерія Лященко:

$$Ar_{\text{отн.}} = \frac{Ar'_0}{Ar_B} = f(Ly) \quad (1.27)$$

З цієї ж причини замість діапазону псевдозрідженого стану зручно використовувати відношення граничних значень Ly , при даному Ar :

$$Ly_{\text{отн.}} = \frac{Ly_B}{Ly'_0} = f(Ar) \quad (1.28)$$

Залежності (1.27) і (1.28) представлені на рис. 1.8.

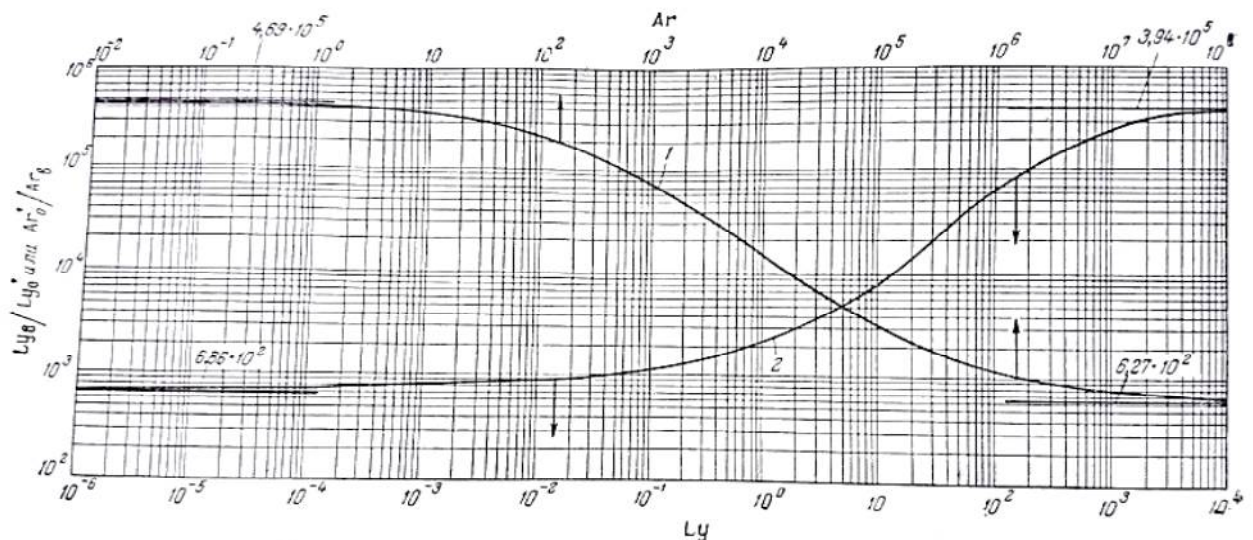


Рис. 1.8– Межа існування псевдозрідженого шару (стрілками вказана абсциса відліку) 1- залежність $Lu_{отн.}$; 2- залежність $Ar_{отн.}$.

1.6. Процеси сушіння

Сушка [34, 35, 36, 37, 38, 39]

в псевдозрідженому шарі дозволяє різко інтенсифікувати процес зневоднення як си-
учих матеріалів, так і пасто-подібних, волокнистих речовин, тканин і картону,
атако ж розчинів і суспензій.

Ефективність процесу зростає внаслідок різкого збільшення поверхні контакту фаз і
з підвищення допустимої температури сушильного агента,
атако ж за рахунок розміщення в псевдозрідженому шарі поверхонь нагріву
(використання високих значень коефіцієнта тепловіддачі).

Присушіння термочувливих матеріалів можуть виявитися труднощі інтенсифікуват
і процес, змінюючи лише параметри зріджуючого агента;
в цьому випадку тепловшар підводять за допомогою внутрішніх теплообмінників.

Температура поверхонь нагріву всередині шару може при цьому перевищувати
температуру термодеструкції матеріалу, так як його частки знаходяться лише в
короткочасному контакті з нагрітою поверхнею.

До характерних особливостей сушіння в псевдозрідженому шарі слід
віднести утворення великої кількості пилу. Остання може з'являтися при
руйнуванні дрібних частинок в процесі сушіння не тільки внаслідок стирання і
високих термічних напружень в частці, а й в результаті виникнення
нерелаксуємого градієнта тиску, що утворюється за рахунок швидкого
випаровування вологи всередині частинки.

Якщо висушуваний матеріал містить головним чином поверхневу вологу
і процес сушіння протікає в основному в періоді постійної швидкості і в умовах
балансової задачі, то найважливішим чинником, що визначає продуктивність
апарату, є швидкість підведення тепла в шар. Це природно, тому що процес
сушіння при сприятливій гідродинамічній обстановці в шарі не лімітується
швидкістю тепло- і масообміну внаслідок вельми розвиненої поверхні контакту
фаз.

Якщо матеріал містить в основному пов'язану вологу, то швидкість його сушіння в більшій мірі залежить від температури шару, яку слід підтримувати на максимально допустимому рівні.

При сушінні в періоді постійної швидкості доцільно працювати з низькими шарами в однокамерних апаратах при можливо більш високих швидкостях газу; при сушінні в другому періоді – з високими шарами в багатокамерних апаратах при низьких швидкостях газу.

На рис. 1.9 наведена схема установки для сушки себацінової кислоти [40]. Повітря через фільтр 1 і калорифер 2 подається в сушильну камеру 4, куди безперервно дозується шнеком 5 вологий матеріал. Висушений матеріал «переливається» через поріг 3 і виводиться з апарату. Повітря після знепилювання в циклоні 8 і фільтрі 9 викидається в атмосферу. Забезпечуючи сушку матеріалу до вологості 0,1%, апарат стійко працює з вологостімаванням понад 30 кг / (м² · год.).

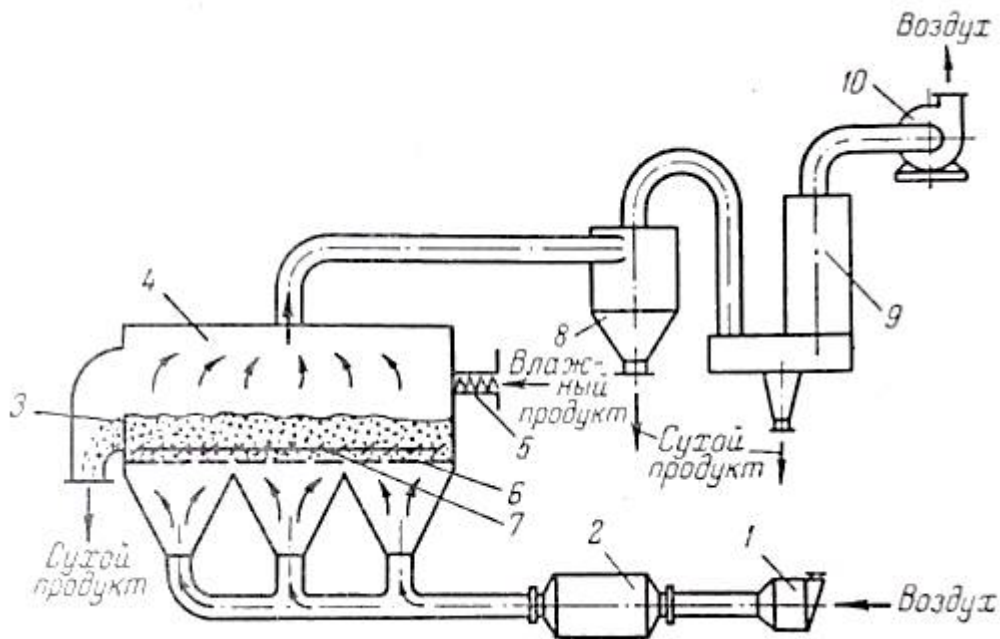


Рис. 1.9– Схема установки для сушки себацінової кислоти

Прямокутна сушарка [40] для себацінової кислоти (рис. 1.10) перетином **0,6 × 2,5** і висотою 1,4 м була забезпечена збудником (каналорушійцем) 7, що запобігає утворенню каналів, що істотно зменшує (з 50 приблизно до 10%) винесення частинок з шару з відпрацьованим повітрям.

Всередині камери на відстані 30 – 40 мм від площини газорозподільної решітки змонтована прямокутна рама з поперечними планками зі смугової сталі, яка здійснює зворотньо-поступовий рух уздовж решітки. Робоче повітря підводиться в камеру через чотири прямокутних дифузора від загального повітрявода. Дифузори забезпечені дроселями, що дозволяють регулювати витрату повітря по довжині камери. Вологий матеріал подається тригвинтовим шнеком 4 по всій ширині камери. Для запобігання зависання вологого матеріалу нижня частина бункера 2 вільно підвішена на гумових амортизаторах і забезпечена вібратором 3.

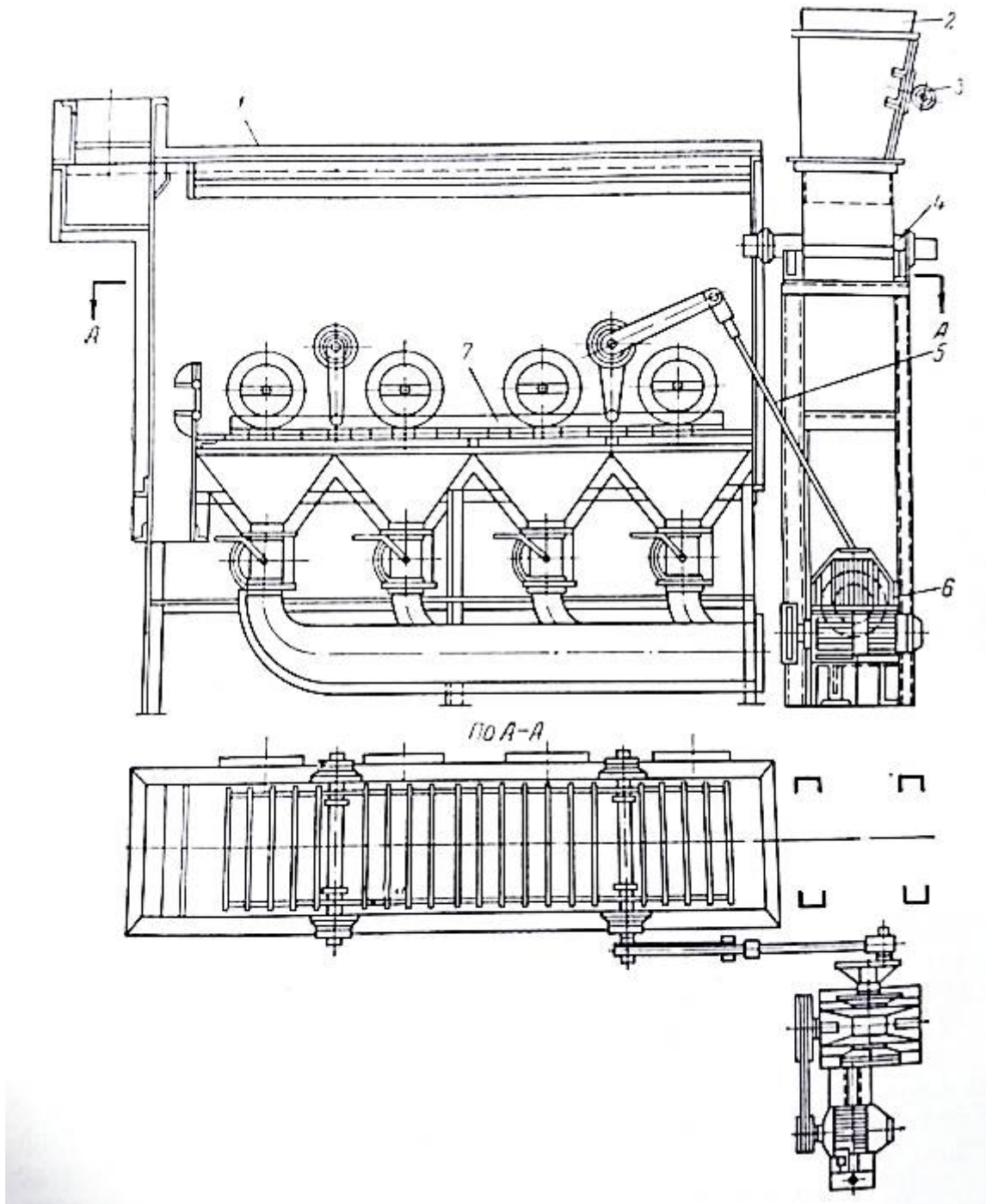


Рис.1.10– Загальний вигляд сушарки

Серед сушильних апаратів напівбезперервної дії становить інтерес апарат, зображений на рис. 1.11 [41]. Переміщення матеріалу по решітці здійснюється за допомогою секторних перегородок 2, закріплених на валу.

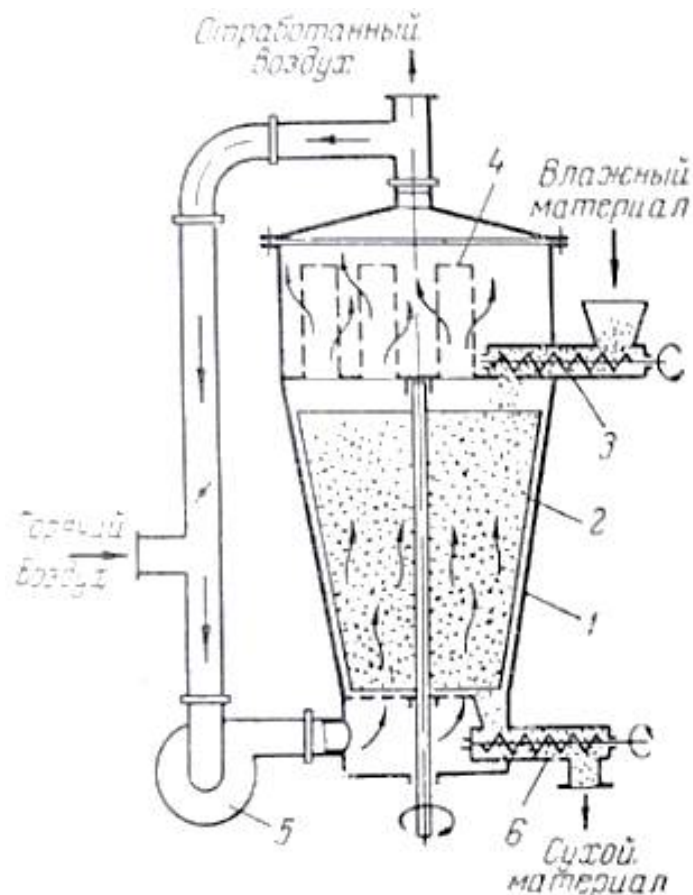


Рис. 1.11– Схема сушарки напівбезперервної дії з секторними перегородками

Для сушіння органічних дрібнозернистих матеріалів створена [49] сушарка з пульсуючою подачею сушильного агента в шар (рис. 1.12). Цим шляхом вдається уникнути стійкого каналоутворення і створити сприятливу гідродинамічну обстановку в апараті. Уведення газу в камеру перекрито направляючими щитками 6. Підведення сушильного агента від колектора перекриваються швидкодіючими клапанами 7, що відкриваються і закриваються в певній послідовності, що задається командним апаратом. Час відкривання клапана 7 в залежності від висоти шару і властивостей матеріалу становить від 0,08 до 0,2 сек. Клапан повинен закритися до того, як подана порція газу пройде весь шар. Перед наступною подачею газу матеріал повинен встигнути прийти в нерухомий стан для забезпечення щільного контакту між частинками і ефективного розподілу в шарі наступної порції газу. Доцільно при п'яти вводах подавати газ по черзі: в перший, третій, п'ятий, в другий, четвертий, знову в перший і т.д.

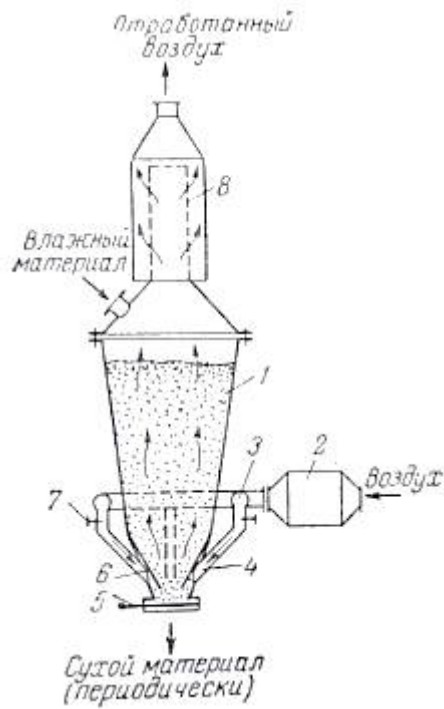


Рис. 1.12– Сушарка з імпульсною подачею газу

Сушка пастоподібних продуктів в псевдозрідженому шарі лише останнім часом почала впроваджуватися в промисловість. При організації цього процесу виникають труднощі, пов'язані з вибором конструкції живильника і газорозподільного пристрою. У числі інших застосовують дві конструкції живильника: шнековий [42] і вібраційний [37]. Однак застосування першого пов'язано з деякими істотними особливостями газорозподільного пристрою, розглянутими нижче.

Відомо [42], що збільшення швидкості зріджуючого агента аж до швидкостей виносу не ліквідує повністю застійних зон ні на периферії шару, ні безпосередньо на решітці. Ці зони з ростом швидкості газу різко зменшуються в об'ємі, але ніколи не зникають повністю. У той же час при великих швидкостях сушильного агента в ряді випадків з'являється небезпека вибуху внаслідок виникнення статичної електрики і перевищення нижньої межі вибуховості пилоподібних систем. Якщо в якості сушильного агента застосовувати повітря або топкові гази з підвищеним вмістом кисню, то при температурі, що перевищує температуру деструкції, не виключена можливість

«зшивок» молекул високополімерів типу поліакрілонітрила в агрегати або загорання матеріалу, що лежить на решітці і на периферії шару.

У разі термолабільних речовин потрібні спеціальні заходи для обмеження контакту висушуємого матеріалу з нагрітою поверхнею. Шнековий живильник не дозволяє отримати гранули певної довжини. Важкі великі агломерати полімеру, потрапляючи на нерухому решітку, швидко забивають її, незважаючи на збільшення лінійних швидкостей газу. З цієї причини шнековий живильник, мабуть, доцільно застосовувати спільно з рухомою газорозподільною решіткою, застосування якої не тільки перешкоджає утворенню застійних зон, але і сприяє грануляції продукту.

Схема укрупненої напівзаводської установки для сушки волокнуутворюючих полімерів приведена на рис. 1.13.

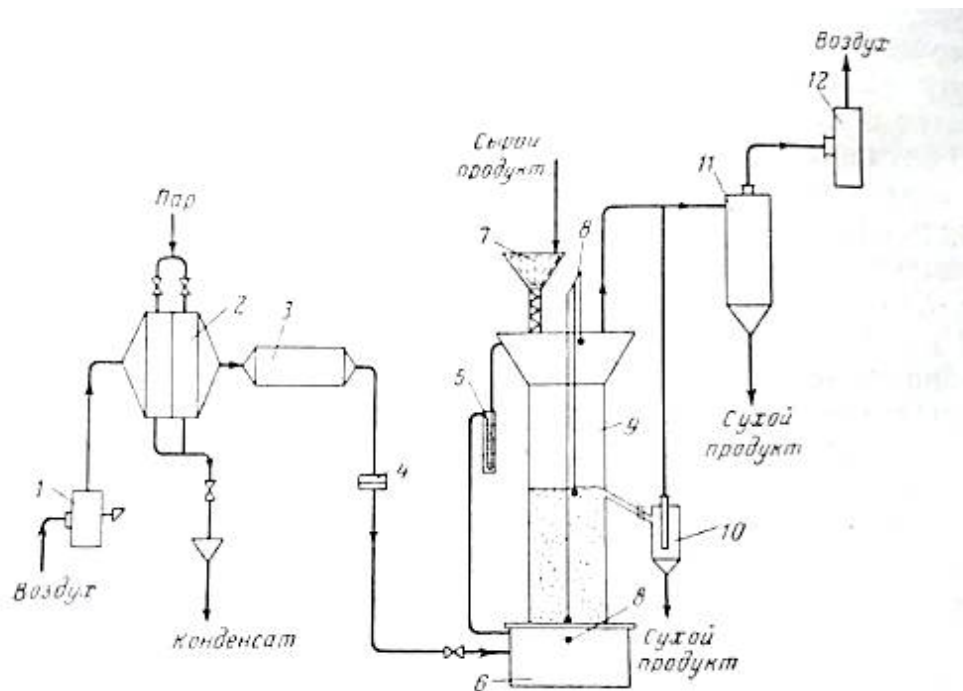


Рис. 1.13– Схема установки для сушіння пастоподібних волокнуутворюючих полімерів в псевдозрідженому шарі

Повітря вентилятором високого тиску через паровий 2 і електричний 3 калорифери подається в сушарку 9. Вологий продукт завантажується в сушилку шнеком 7. Сухий продукт вивантажується в бункер 10 приймального циклону. Повітря, що виходить з сушарки обезпилюється в циклоні 11 і викидається в

атмосферу хвостовим вентилятором 12. Зауважимо, що суттєвою особливістю апарату зрешітками, що обертаються є також порівняно невелике пило винесення. Регулювання температури в шарі здійснюється шляхом зміни подачі сирого полімеру за допомогою блокування живильника з термопарою, що вимірює температуру шару в безпосередній близькості до розподільної решітки. Сушарка забезпечена газорозподільною беспровальною перфорованою решіткою, що обертається, яка є одночасно гранулятором.

За кордоном розроблені прості та ефективні апарати для сушіння тканин і закріплення барвників на них. Тканина, що підлягає обробці (рис. 1.14) пропускається через ванну з дисперсним барвником (на схемі не показана), віджимається на валках 4, після чого направляється для сушіння і закріплення барвника в сушильну камеру з псевдозрідженим шаром 2 піску або скляних (або шлакових) кульок діаметром 0,1-1мм. В шарі розміщені електронагрівальні елементи або трубки 8, що обігріваються паром. Після виходу з шару тканина струшується вібруючим роликком 6 для відділення прилиплених часток. Інтенсивність сушіння в псевдозрідженому шарі приблизно в 3 рази вище, ніж в нині існуючих апаратах.

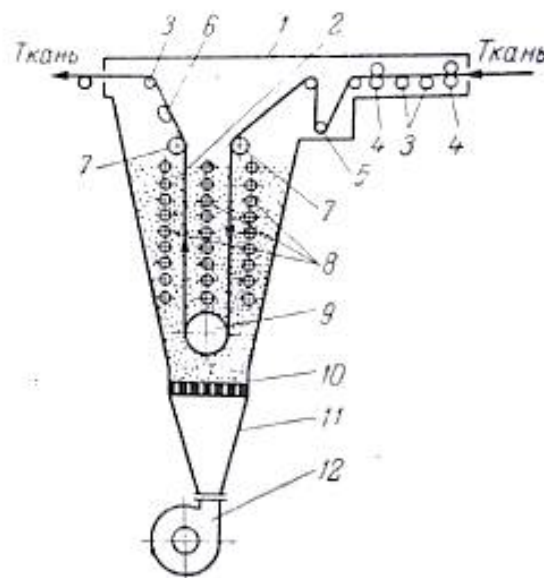


Рис. 1.14— Схема установки для сушіння тканин в псевдозрідженому шарі піску

Значне налипання піску на рухому тканину може привести до псування дорогих валків, тому в ряді випадків використовують тільки скляні або шлакові кульки.

Конструктивним недоліком двопрохідного апарату є наявність в псевдозрідженому шарі обертового перфорованого барабана 9, через отвори якого вводиться повітря для зрідження шару, що знаходиться між двома полотнищами. Не виключено також потрапляння кульок між висушуваним матеріалом і барабаном і, як наслідок, механічні пошкодження матеріалу.

Однопрохідна сушарка вимагає надійного гнучкого ущільнення на вході в апарат.

Розподільні перфоровані решітки (рис. 1.15) можна поділити на три типи [43, 44]:

факельні решітки (осі отворів розташовані перпендикулярно до площини решітки) з вертикальним розміщенням газового потоку. Такі решітки

рекомендують застосовувати при і незначній мірі розширення шару. Найістотнішим недоліком цих решіток є наявність застійних зон твердого матеріалу між отворами;

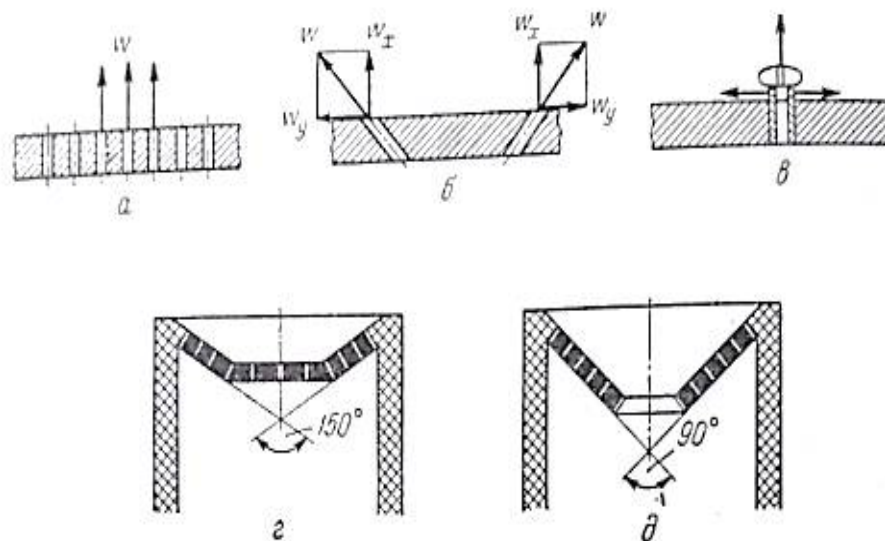


Рис. 1.15– Типи розподільних решіток
(а - факельна; б, г, д - вихрові; в - комбінована)

вихрові решітки (отвори розташовані під кутом до площини решітки). Тут газовий потік має не тільки поступальний, але і обертальний рух, що сприяє більш рівномірному псевдозрідженню. Такі решітки рекомендують

застосовувати при $\frac{H_0}{D_a} = 0,75 - 5$ і значної міри розширення шару;

комбіновані решітки містять, елементи факельних і вихрових решіток і в значній мірі усувають можливість утворення застійних зон твердого матеріалу.

1.7. Газорозподільна решітка для апаратів киплячого шару за патентом SUN № 940829

Метою винаходу є підвищення продуктивності апарату киплячого шару за рахунок запобігання налипанню оброблюваного матеріалу на газопідвідні ковпачки [50].

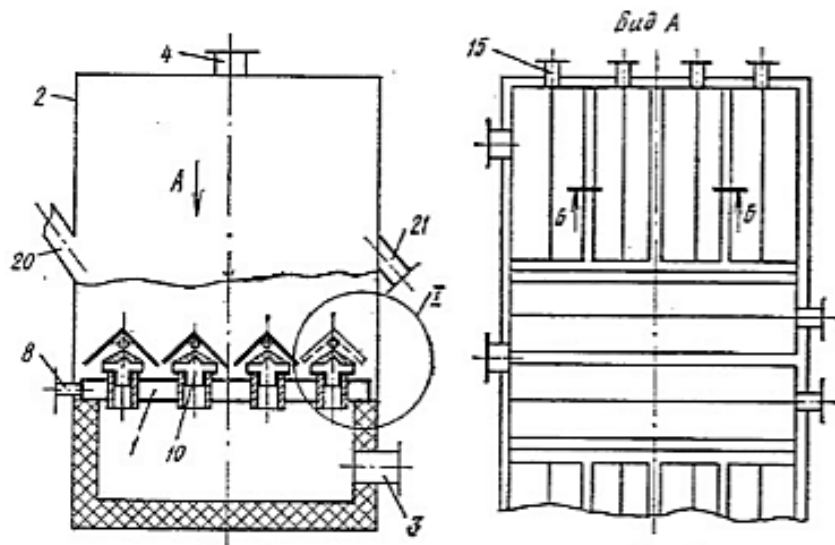


Рис. 1.16– Апарат з газорозподільною решіткою

На рис.1.16 зображений апарат з газорозподільною решіткою;
на рис. 1.17 — розріз Б — Б рис. 1.16; на рис. 1.18 — вузол І рис. 1.16.

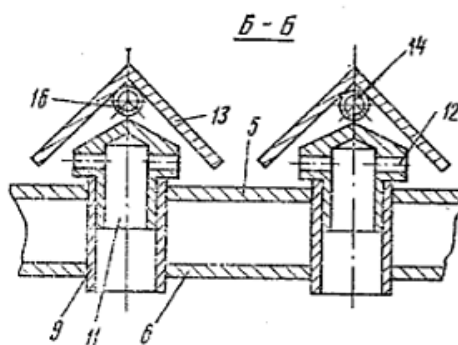


Рис. 1.17– розріз Б — Б

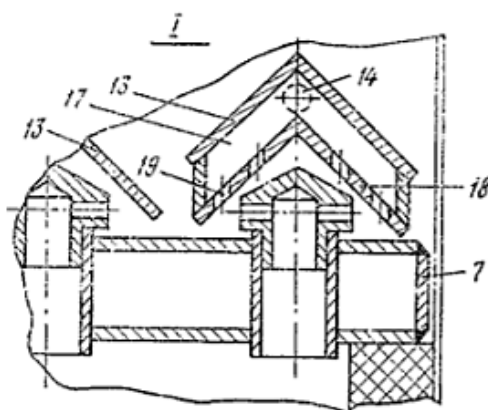


Рис. 1.18– вузол I

Газорозподільну решітку 1 встановлюють всередині апарату киплячого шару, що містить футерований корпус 2 з патрубком 3 для підведення нагрітого топкового газу і патрубком 4 для відводу відпрацьованого газу.

Решітка 1 містить верхній 5 і нижній 6 перфоровані листи, щільно з'єднані з ними периферійний лист 7, патрубок 8 і трубчасті вкладиші 9, в які вставлені з щільним приляганням газопідвідні ковпачки 10 з вхідним каналом 11 для введення газу в ковпачок і отворами 12 для його виходу в шар матеріалу для створення кипіння. Над кожним ковпачком 10 встановлений екран, що складається, наприклад, з косинців 13, встановлених ребром вгору з зазором між їх стінками, при цьому між екранами і ковпачками 10 розміщені охолоджуючі перфоровані в нижній частині труби 14 з патрубками 15 для підведення повітря і отворами 16 для відведення охолоджуючого повітря в киплячий шар, зверненими в бік решітки 1. Екран може бути виконаний у вигляді порожнього короба 17, утвореного косинцями 13 екрану і

прикріпленими до них додатковими стінками 18 з отворами 19, зверненими до решітки 1. Матеріал завантажують в апарат через патрубок 20, а вивантажують через патрубок 21.

Газорозподільна решітка працює наступним чином.

Нагрітий топковий газ під тиском підводять по патрубку 3 в нижню частину корпусу 2 апарату під решітку 1. Далі газ проходить через трубчасті вкладиші 9 і канали 11 ковпачків 10 і, виходячи через отвори 12, створює кипіння шару над решіткою 1. Відпрацьований топковий газ відводять через патрубок 4. Матеріал завантажують в апарат через патрубок 20 і вивантажують через патрубок 21. Екран з косинців 13 запобігає контакту матеріалу з ковпачками 10, нагрітими до температури топкового газу, яка вище середньої температури шару.

Зазор між ковпачками 10 і косинцями 13 і зазор між косинцями 13 встановлюють таким чином, щоб провалившись в зазори матеріал, лягаючи під кутом природного укосу на лист 5, не досягав ковпачків 10. Для запобігання оплавлення цього матеріалу нагрітим газом, що виходить з отворів 12, матеріал аерують повітрям, що виходить з отворів 16 і 19. Крім того, цим же повітрям матеріал віддувають з простору між екраном і ковпачками 10, запобігаючи його налипанню на ковпачки та одночасно охолоджуючи екран.

Повітря в охолоджуючі труби 14 подають через патрубки 15. Застосування екрану у вигляді порожнього короба 17 дозволяє більш рівномірно розподілити отвори 19 по його поверхні, що підвищує надійність в роботі екрану.

Оплавлення матеріалу і його налипання на лист 5 решітки 1 запобігають, охолоджуючи її шляхом подачі через патрубок 8 охолоджуючого повітря в порожнину, утворену листами 5, 6 і 7.

Оброблене (нагріте) повітря відводять через отвір в листі 6 (на рисунках не показано) під решітку 1, в нижню частину апарата, змішуючи його з топковим газом.

Виконання запропонованої решітки з екраном і охолоджуючими пристроями дає можливість запобігти налипанню матеріалу на ковпачки, що

дозволяє збільшити коефіцієнт використання апарату киплячого шару і термін служби екрану.

Наявність екрану, забезпеченого охолоджуючими пристроями, що запобігають налипанню матеріалу на ковпачки, дозволяє збільшити температуру підводимого топкового газу, що дає можливість інтенсифікувати процес і підвищити продуктивність апарату при збереженні його габаритів.

1.8. Аеродинаміка напірних систем

Аеродинаміка – розділ механіки суцільних середовищ, в якому метою досліджень є вивчення закономірностей руху повітряних потоків та їх взаємодії з перешкодами та рухомими тілами.

Частина повної енергії, що йде на подолання сил гідравлічного опору, що виникають при русі реальної (в'язкої) рідини (газу) по трубах і каналах, втрачається для даної системи (мережі) безповоротно. Ця втрата енергії обумовлена незворотнім переходом механічної енергії (роботи сил опору) в теплоту. Тому під гідравлічним опором або гідравлічними втратами мається на увазі величина, рівна безповоротної втрати повної енергії на даній ділянці. Відношення втраченої повної енергії (потужності) потоку до кінетичної енергії (потужності) або втраченого повного тиску, усередненого по масовій витраті, до динамічного тиску в умовленому перетині називають коефіцієнтом гідравлічного опору.

Втрата повної енергії (повного тиску) – величина істотно позитивна. Однак різниця повних енергій (повних тисків) на даній ділянці і відповідно коефіцієнт гідравлічного опору, який визначається за цієї різниці, в деяких випадках можуть приймати і негативні значення. Це має місце, коли з'являються додаткові сили, зовнішні по відношенню до даного потоку. Наприклад, при відсмоктуванні потоку рідини (газу) через бічний канал, забитий урівень в стінку під кутом, більшим 90° , і наявності зовнішнього (по відношенню до бічного каналу) потоку останнім створюється додатковий наддув. В результаті потік в бічному каналі набуває додаткову енергію, що

перевершує за деяких відносинах w_∞ / w_0 енергію, яка витрачається на механічну роботу сил опору каналу.

У наведеному прикладі від'ємне значення коефіцієнта опору вказує, що відбувається приріст енергії, а не втрата її.

Більшість коефіцієнтів місцевого опору отримано при технічно гладких стінках каналів; вплив шорсткості на місцевий опір вивчено мало. Тому у всіх випадках, якщо немає спеціальних застережень, слід вважати стінки фасонних частин і інших ділянок каналу гладкими. Вплив шорсткості (яка починає позначатися лише при $Re > 4 \cdot 10^4$) можна врахувати наближено, множачи коефіцієнт ζ на величину 1,1 - 1,2 і більше (при великій шорсткості).

Режим руху рідини (газу) буває ламінарним і турбулентним. При ламінарному режимі течія стійка, а струмені потоку рухаються, не змішуючись, плавно огинаючи перешкоди, що зустрічаються на їхньому шляху.

Турбулентний режим характеризується безпорядковим переміщенням кінцевих мас рідини (газу), сильно перемішуються між собою.

Для кожної конкретної установки існує деякий діапазон «критичних» значень числа Re , при яких відбувається перехід від одного режиму до іншого (перехідна область). Нижня межа критичного числа Re для труби круглого перетину становить близько 2300. Верхня межа числа Re залежить від умов входу в трубу, стану поверхні стінок і т. п.

Рідина (газ) знаходиться в рівновазі, якщо для кожної довільно виділеної її частини результуюча всіх сил, прикладених до цієї частини, дорівнює нулю.

Витратою рідини або газу називають масу (або обсяг) рідини (газу), що протікає через даний поперечний переріз труби (каналу) в одиницю часу.

У кожній мережі, як і в окремих ділянках, частина повного тиску, що йде на подолання сил гідравлічних опорів, є для неї безповоротно втраченою, так як через молекулярну і турбулентну в'язкості середовища, що рухаються, механічна робота сил опору перетворюється необоротно в теплоту. Тому загальна енергія (що включає і теплову енергію) потоку на даній ділянці труби при відсутності теплопередачі через стінки залишається незмінною. Однак стан потоку при цьому змінюється, так як тиск падає. Температура ж уздовж потоку

при незмінній швидкості не змінюється. Пояснюється це тим, що робота розширення, обумовлена падінням тиску, цілком перетворюється в роботу сил опору, і теплота, що виникає з цієї механічної роботи, замінює охолодження, що отримується внаслідок розширення.

Разом з тим енергія, придбана потоком в результаті роботи компресора (вентилятора і т. п.), Для даної мережі втрачається у вигляді кінетичної або теплової енергії при виході рідини (газу) в навколишнє середовище (в інший обсяг).

1.9. Опір при течії по прямим трубам

Втрати тиску по довжині прямої труби (каналу) постійного поперечного перерізу (лінійні втрати або втрати на тертя) обчислюються за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta p_{\text{тр.}} = \lambda \frac{l}{D_r} \cdot \frac{\rho w_0^2}{2} = \zeta \frac{\rho w_0^2}{2} \quad (1.29)$$

Використання гідравлічного (еквівалентного) діаметра D_r в якості характерного розміру в формулах опору допустимо тільки в тих випадках, коли по всьому або майже по всьому периметру перетину товщина пристінного шару (в межах якого швидкість змінюється від нуля до значення, близького до максимуму) дуже мала по відношенню з розміром поперечного перетину каналу [45].

У разі турбулентної течії при великих числах Re швидкість в основному змінюється в межах тонкого пристінкового шару. Тому, якщо використовувати D_r в якості характерного розміру, то закон опору для труб різної форми поперечного перерізу виявляється приблизно однаковим. Однак і при турбулентній течії для окремих геометричних форм коефіцієнт опору тертя має різні значення.

Для розрахунку гідравлічного опору труби (каналу) при стабілізованому ламінарному потоці використовувати D_r не можна. При цьому режимі його застосування допустимо тільки для вхідної частини початкової ділянки труби,

коли товщина ще дуже мала [46]. Для визначення опору вводять відповідні поправки, що враховують вплив форми поперечного перерізу труб (каналів).

Опір руху рідини або газу при ламінарному режимі обумовлено силами внутрішнього тертя (в'язкістю), що з'являються при переміщенні одного шару рідини (газу) щодо іншого. Сили в'язкості пропорційні першому ступеню швидкості потоку.

Завдяки переважанню при ламінарному режимі сил в'язкості навіть обтікання виступів шорсткою поверхні відбувається плавно. Тому шорсткість стінок, якщо вона не дуже велика, не впливає на опір, і коефіцієнт опору тертя при цьому режимі завжди залежить тільки від числа Рейнольдса.

При збільшенні числа Re починають переважати сили інерції, пропорційні квадрату швидкості. При цьому виникає турбулентний рух, що характеризується появою поперечних складових швидкості, що викликають перемішування рідини (газу) у всьому потоці і обмін кількістю руху безладно рухаючихся мас рідини. Все це призводить до різкого зростання опору руху при турбулентному режимі в порівнянні з ламінарним.

При шорсткій поверхні стінок обтікання виступів відбувається з відривом струменя, і коефіцієнт опору в цьому випадку залежить не тільки від числа Re , але і від відносної шорсткості.

Труби та канали можуть бути як гладкими, так і шорсткими. При цьому шорсткість може бути рівномірною (рівномірно-зернистою) і нерівномірною. Обидва види шорсткості розрізняють за формою виступів, їх розмірами, проміжків між ними і т. п. Більшість технічних труб характеризуються нерівномірною шорсткістю.

Труби можна вважати гладкими, поки висота шорсткуватих виступів менше товщини вузького підслоя.

1.10. Опір при течії на вході в труби

При вході потоку в пряму трубу (канал) постійного поперечного перерізу (рис.1.19) опір визначається двома параметрами: відносною товщиною стінки

вхідної кромки труби і відносною відстанню від місця обріза труби до стінки, в яку вона закладена.

Максимальне значення коефіцієнта опору ζ прямої вхідної ділянки має при абсолютно гострій кромці і видаленні обріза труби від стінки, в яку вона закладена, на нескінченно велику відстань. В цьому випадку $\zeta=1,0$.

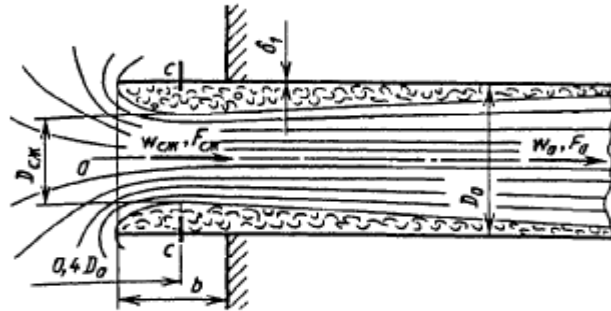


Рис. 1.19– Схема входу потоку в пряму трубу з необмеженого простору

Мінімальне значення коефіцієнта опору ζ , яке може бути досягнуто при потовщенні вхідної кромки, дорівнює 0,5. Таке ж значення має ζ при закладенні обріза труби врівень зі стінкою.

При вході в пряму трубу (канал) потік обтікає кромку вхідного отвору, але при недостатньо закругленій кромці вхідного отвору потік по інерції відривається поблизу входу від внутрішньої поверхні. Цей відрив потоку і викликане їм вихреутворення є основними джерелами втрат тиску при вході. Відрив потоку від стінок труби тягне за собою зменшення поперечного перерізу (стиснення) струменя.

Потовщення, зріз або закруглення стінки вхідної ділянки, а також близьке розташування обріза труби (каналу) від стінки, в яку ця труба забита, призводять до того, що поворот потоку навколо вхідної кромки виходить більш плавним, і зона відриву потоку зменшується, завдяки чому зменшується і опір входу.

1.11. Опір при перетиканні потоку через діафрагму

При раптовому розширенні поперечного перерізу труби (каналу) виникають так звані втрати на «удар». Коефіцієнт місцевого опору удару в разі

рівномірного розподілу швидкостей по перетину вузького каналу і турбулентної течії залежить тільки від відносин площ вузького і широкого перетинів.

При раптовому розширенні перетину труби утворюється струмінь, відокремлений від решти середовища поверхнею розділу, який розпадається і згортається в потужні вихори. Втрати на удар при раптовому розширенні пов'язані з зазначеним вихреутворенням на ділянці.

У реальних умовах розподіл швидкостей на ділянці перед раптовим розширенням, як правило, не буває рівномірним.

При утворенні в трубі (каналі) з постійним поперечним перерізом нерівномірного поля швидкостей подальше вирівнювання потоку також супроводжується непоправними втратами.

Втрати тиску на ділянці з раптовим розширенням можуть бути значно зменшені шляхом дроблення вихорів в цій ділянці за допомогою поперечних перегородок [47]. Верхні кромки цих перегородок повинні знаходитися на рівні верхньої межі вихрової зони і не виступати в активний потік.

При раптовому звуженні перетину схема потоку в основному аналогічна тій, яка спостерігається при раптовому розширенні, коли виникають втрати на удар. Тільки в даному випадку ці втрати виявляються головним чином при розширенні струменя, стислій після входу з широкого каналу в вузький, до повного перетину вузького каналу.

При малих коефіцієнтах живого перетину діафрагми потік через отвори набуває великі швидкості навіть при порівняно невеликій швидкості в трубопроводі перед діафрагмою. При цьому починає позначатися вплив стисливості, різко підвищує коефіцієнт опору діафрагми.

1.12. Опір при течії на виході з труб

При виході потоку з мережі кінетична енергія виходячого струменя завжди втрачається для цієї мережі; тому в загальному випадку втрати на виході складаються з внутрішніх втрат в вихідній ділянці і втрат динамічного тиску струменя, що виходить з мережі.

У разі вільного виходу потоку з прямої ділянки труби (каналу) постійного перетину в великий обсяг повні втрати зводяться тільки до втрат динамічного тиску на виході.

Коефіцієнт ζ залежить від характеру розподілу швидкостей на виході. При рівномірному розподілі швидкостей він дорівнює одиниці, в інших випадках завжди більше одиниці.

У разі припливу струменя через прямі канали струмінь виходить з них без підгортання перетину, завдяки чому втрати динамічного тиску не стають більше його значення, взятого по середній швидкості в перерізі каналу [48].

2. НОВА СУШАРКА З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ

У хімічній промисловості і суміжних областях для сушіння матеріалу використовують апаратиз псевдозрідженим шаром. Схема такого апарату представлена на рис. 2.1. Як правило патрубок введення газу для псевдозрідження знаходиться збоку. Апарат складається з двох камер. Нижня камера 1 призначена для розподілу потоку, а у верхній камері 2 здійснюється процес сушіння в режимі псевдозрідження. Бокове введення не дозволяє рівномірно розподіляти газ по патрубкам в результаті чого виникає фонтануючий режим та відбувається нерівномірність псевдозрідження.

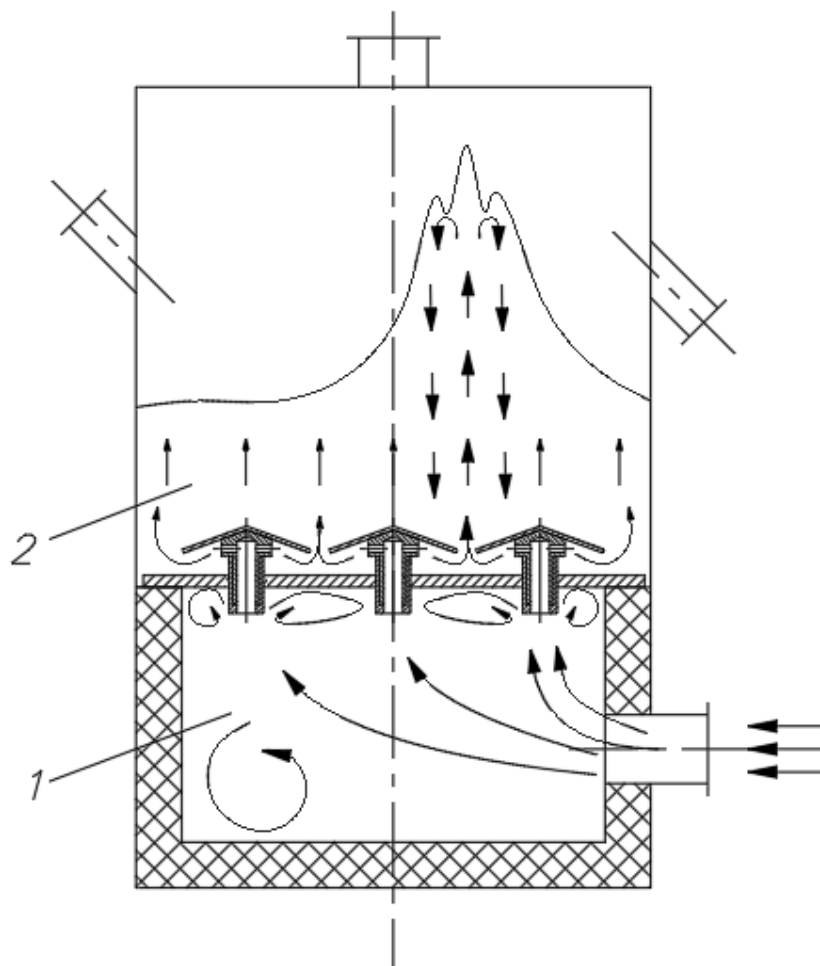


Рис. 2.1 – Фонтанування в сушарці з псевдозрідженим шаром

1 – нижня камера; 2 – верхня камера

Для вирішення вказаної проблеми пропонується новий розподільник потоку, який складається з патрубків і вмонтованого в нього дифузора.

Розглянемо роботу одиночного розподільного патрубка з дифузorzом представленого на рис. 2.2. Пристрій працює наступним чином: газ потрапляючи до патрубка спрямовується до дифузора, частина газу проходить крізь дифузorz, а інша частина розвертається утворюючи повітряний клапан. Після проходження дифузора, газ поступово починає займати всю площу перетину патрубка.

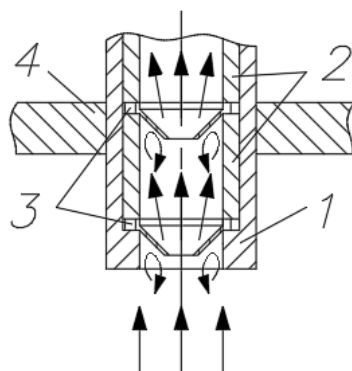


Рис. 2.2 – Утворення повітряного клапана

1 – патрубок; 2 – трубчатий вкладиш; 3 – дифузorz; 4 – розподільна решітка.

При використанні двох патрубків (рис. 2.3), газ буде направлятися до обох патрубків, але нерівномірно. А завдяки дифузору буде утворюватися повітряний клапан і розподіл буде однаковий між двома патрубками.

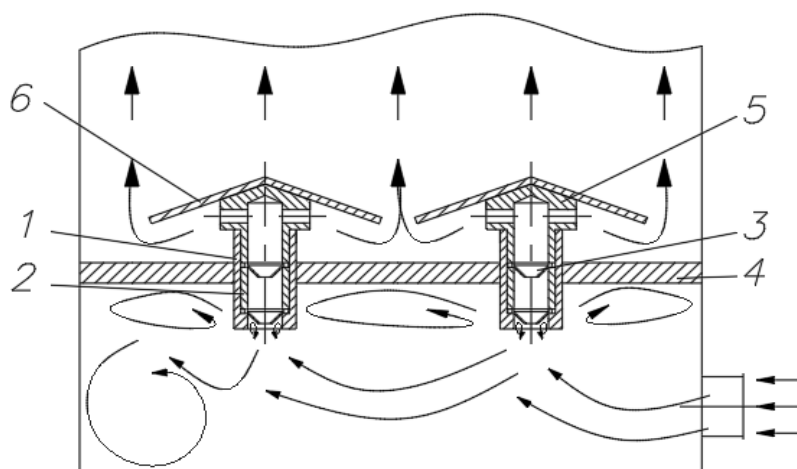


Рис. 2.3 – Розподіл газу між двома патрубками

1 – патрубок; 2 – трубчатий вкладиш; 3 – дифузор; 4 – розподільна решітка; 5 – ковпачок; 6 – екран.

Пропонується нова сушарка з псевдозрідженим шаром яка представлена на рис. 2.4. Вона складається з футерованого корпусу 1 на якому розташовуються патрубки для введення 3 і виведення 4 газу з апарату. В апараті встановлена розподільна решітка 2. В решітку вмонтовані патрубки 7, в середині яких розташовуються дифузори, які щільно зафіксовані трубчастими вкладишами, а зверху розташовуються ковпачки. Над кожним ковпачком встановлений екран, щоб матеріал не забивав ковпачки. Матеріал завантажується в апарат через патрубок 5 і вивантажується через патрубок 6.

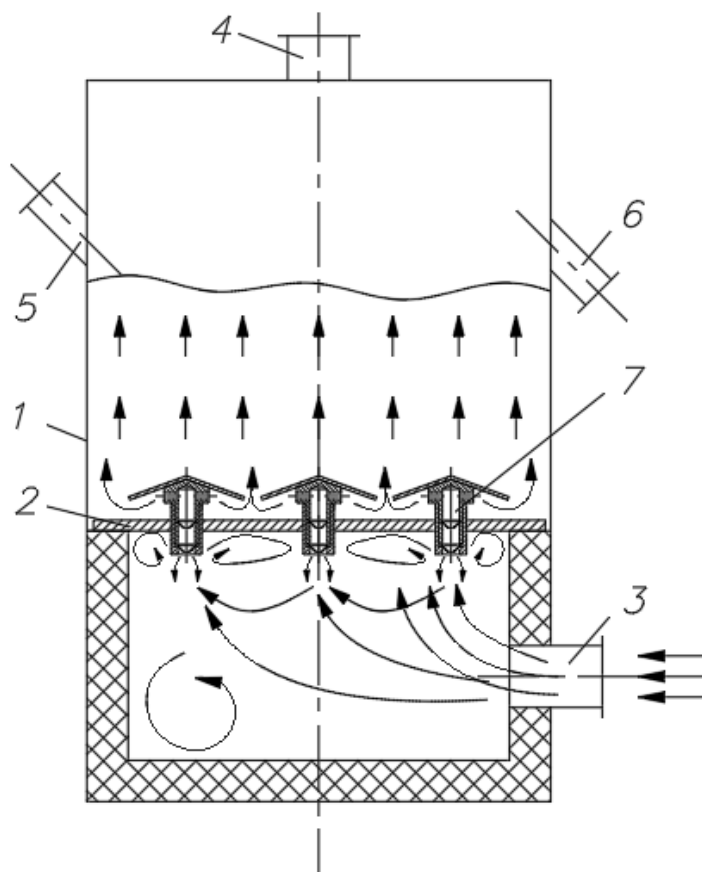


Рис. 2.4 – Рівномірний розподіл газу в сушарці

1 – корпус; 2 – розподільна решітка; 3 – патрубок для введення газу; 4 – патрубок для виведення газу; 5 – патрубок для завантаження матеріалу; 6 – патрубок для вивантаження матеріалу; 7 – розподільні патрубки.

BC' – процес сушки при нерівномірному розподілу потоку;

BC'' – процес сушки при рівномірному розподілу потоку.

При нерівномірному розподілу потоку тепло буде виходити через наскрізний канал, який утворений фонтануванням шару, що збільшить витрати на подачу тепла в апарат.

Кількість тепла при нерівномірному розподілу визначається:

$$q' = \frac{I_2 - I_0}{x_2 - x_1} \quad (2.1)$$

$$Q' = W \cdot q' \quad (2.2)$$

При рівномірному розподілу потоку тепло буде розподілятися по всьому перетину апарату, що зменшить витрати на подачу тепла в апарат відносно нерівномірного розподілу потоку.

Кількість тепла при рівномірному розподілу визначається:

$$q^{1*} = (I_1 Z^{1*} - I_1^0) / (x_{12} - x_{11}) \quad (2.3)$$

$$Q = W \cdot q^{1*} \quad (2.4)$$

В результаті цього отримаємо

$$Q^{1*} > Q' \quad (2.5)$$

Отже при рівномірному розподілу потоку сушка буде проходити краще, що й потрібно було довести.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЕНТУ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ КОРОТКОГО ДИФУЗОРА $\varnothing 10\text{мм}$

3.1. Схема експериментальної установки

Для експериментального дослідження коефіцієнту гідравлічного опору розроблена експериментальна установка, схема якої представлена на рис. 3.1.

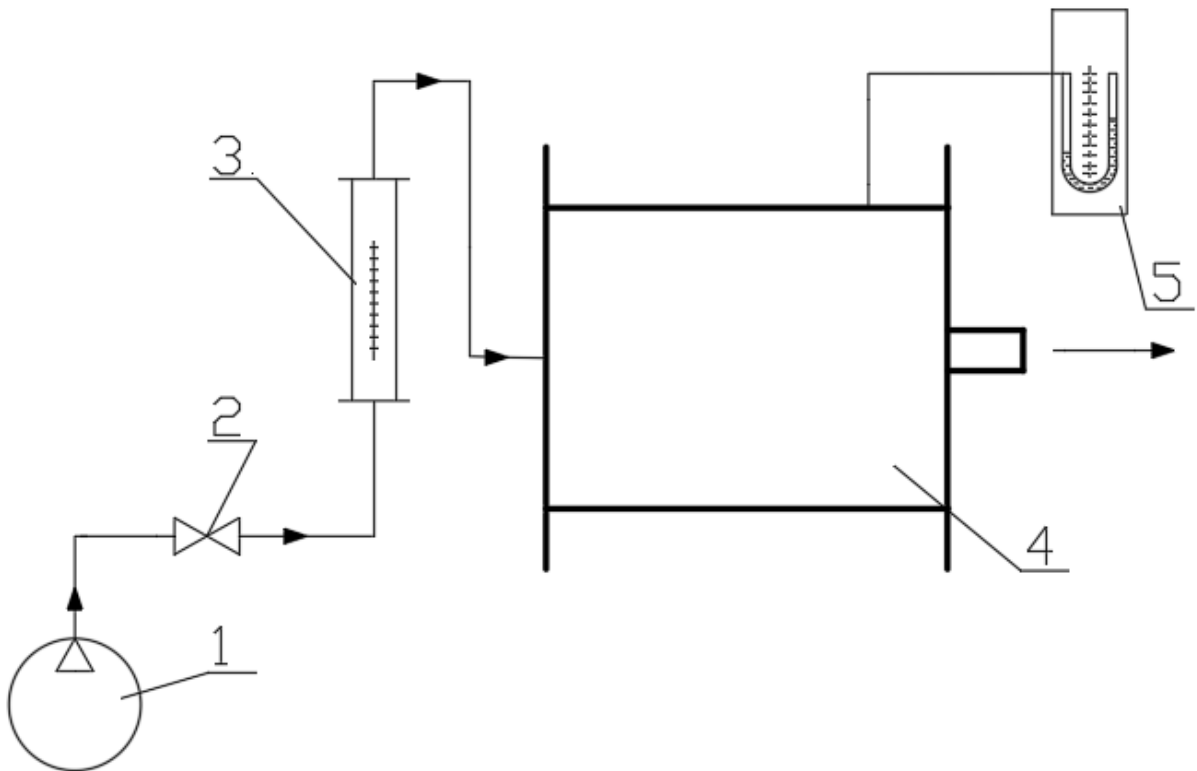


Рис.3.1 – Схема експериментальної установки

1 – компресор; 2 – запірна арматура; 3 – ротаметр; 4 – експериментальний блок;
5 – диференційний манометр.

У експериментальній установці робочим середовищем було повітря, яке подавалося за допомогою компресора 1. Регулювання подачі повітря та фіксування показань на ротаметрі 3 відбувалося за допомогою запірної арматури 2. Потрібна кількість повітря надходить до експериментального блоку 4, який є основним апаратом для виміру коефіцієнту гідравлічного опору. Трубки з досліджуваними елементами – дифузорами та діафрагмами

вмонтовували в експериментальний блок. Результати фіксували за допомогою диференційного манометру 5.



Рис.3.2 – Експериментальна установка (компресор не показаний)

Основним апаратом установки був експериментальний блок, схема якого представлена на рис. 3.3.

Експериментальний блок представляв собою ємність, в якій потік повітря завдяки декількох розворотів формує прямий профіль швидкостей та прямував

до короткої трубки. Основним об'єктом дослідження була металева трубка \varnothing 32x4 мм довжиною 122 мм з дифуззором різного кута нахилу та \varnothing 10 мм (рис 3.4). Гідравлічний опір заміряли диференційним манометром.

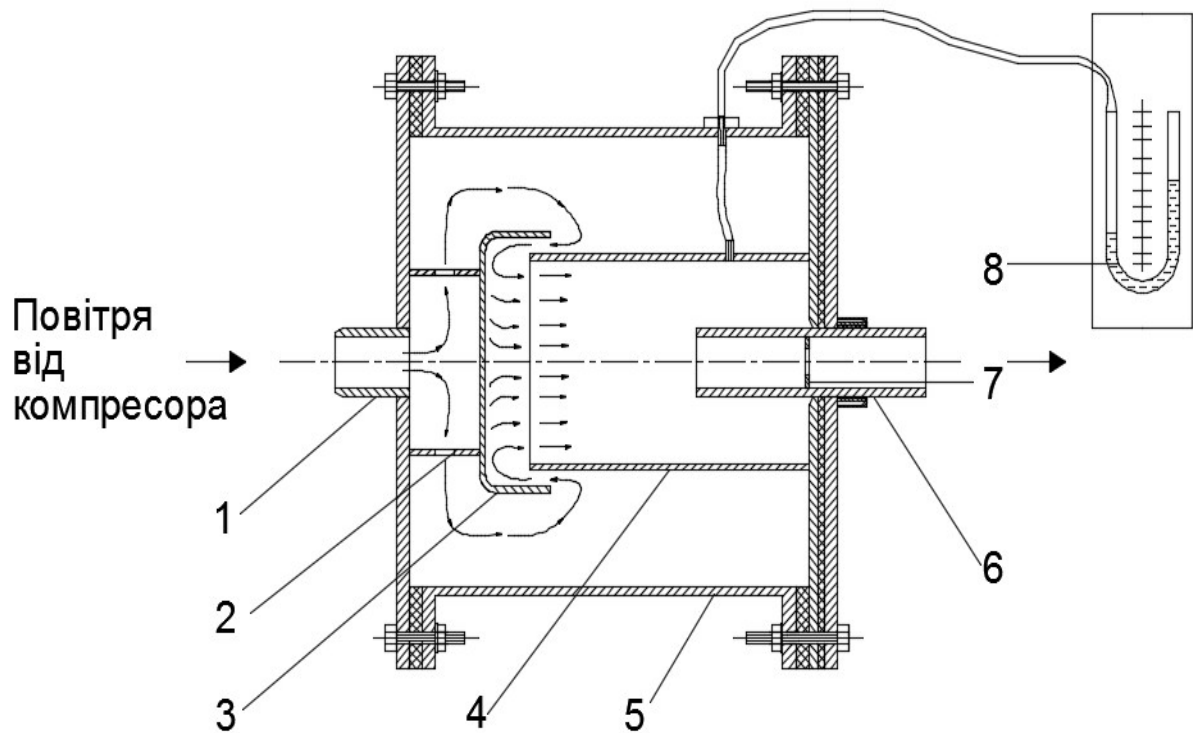


Рис. 3.3 – Експериментальний блок для визначення коефіцієнту гідравлічного опору:

- 1 – вхідний патрубок; 2 – перфорована обичайка; 3 – кришка; 4 - стакан;
 5 – корпус апарата; 6 - металева трубка; 7 – діафрагма або дифузор;
 8 - диференційний манометр.



Рис. 3.4 – Елементи дослідження, діафрагма та дифузори \varnothing 10

3.2. Техніка експерименту та метод дослідження

Експериментальна установка збиралася згідно рисунку 3.1 та перевірялася на герметичність. Далі проводились підготовчі роботи. У експериментальний блок вставляли короткий напірний патрубок, а в нього монтували елементи (дифузори, діафрагми), які піддавалися дослідженню, а саме визначили коефіцієнт гідравлічного опору.

Попередньо, досліді підлягали діафрагми та розраховували її коефіцієнт гідравлічного опору за довідником [53]. Задовільне узгодження результатів експериментів та теоретичних розрахунків надавало змогу для подальших експериментів з дифузорами. Фіксували температуру повітря та атмосферного тиску. Експериментальні данні зводили в таблицю.

3.3. Прибори та вимірювальна техніка

Основною вимірювальною технікою були: диференційний манометр та поплавковий ротаметр. Розглянемо ці пристрої більш детально.

Пристрої з видимим рівнем для заміру тиску, **манометри**, відносяться до рідинних приборів. Рідинні прибори характеризуються простотою конструкції та відносно високою точністю виміру, їх широко застосовують як для лабораторних, так і для технічних вимірів. Рідинні прибори служать для градуїровки та перевірки приборів інших систем, виміру невеликих надлишкових тисків, розрідження, різниці тисків, а також атмосферного тиску.

Диференційний манометр або U – подібний пристрій (рис. 3.5), являє собою скляну трубку 1, вигнуту у вигляді букви U [51]. Трубка укріплена на дошці 2 зі шкалою, розташованої між гілками трубки. Трубка приладу заповнена рідиною (ртуттю, водою, спиртом).

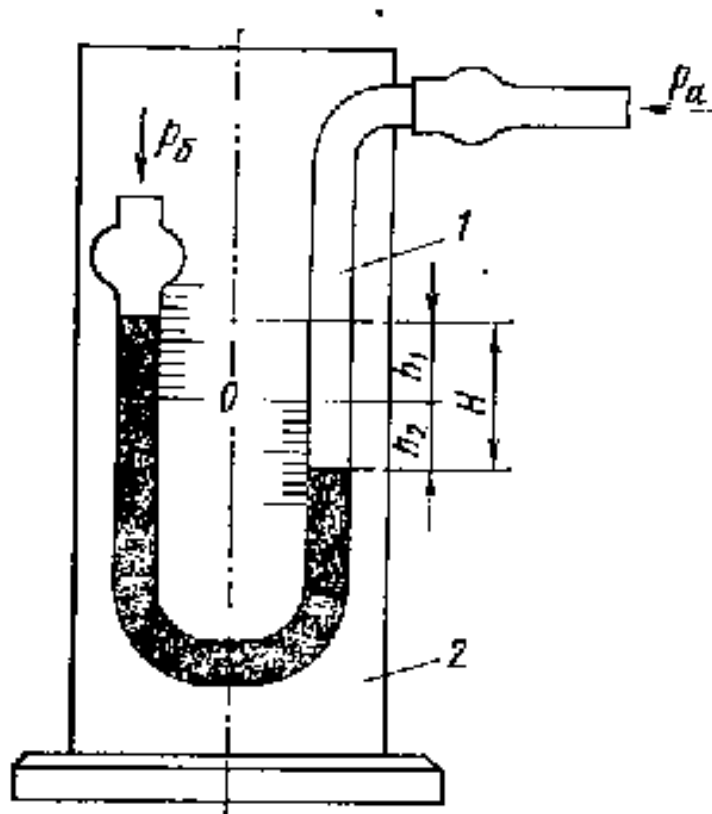


Рис. 3.5 – Двотрубний U – подібний пристрій:

1 – скляна U – подібна трубка; 2 – дошка з нанесеною шкалою.

Система знаходиться в рівновазі, якщо гідростатичний тиск стовпа рідини у відкритому стовпці врівноважується тиском в іншому стовпці. Якщо тиск в просторі, з яким з'єднаний прилад, нижче атмосферного, то рідина в трубках переміститься в зворотному напрямку, і висота її стовпа буде відповідати розрідженню (вакууму). Приєднавши обидва вільних кінця трубки приладу до двох порожнинах з різними тисками, можна по різниці рівнів рідини в приладі визначити різницю тисків.

Прилад наповнений рідиною до нульової позначки шкали. Для визначення висоти стовпа рідини необхідно робити два відліку (зниження в одному стовпці, підйому в іншому) і підсумувати заміряні величини.

До приладів постійного перепаду тисків відносяться **ротаметри**, поплавкові і поршневі витратоміри. Найбільше застосування мають ротаметри й поплавкові витратоміри, шкали яких практично рівномірні. Їх можна використовувати для вимірювання малих витрат; втрати тиску в них незначні і

не залежать від витрат. Ротаметри й поплавкові витратоміри мають великий діапазон виміру, $Q_{\max}/Q_{\min} = 10:1$ [51]. При проведенні експерименту використовували поплавковий ротаметр зі скляною конусною трубкою (рис. 3.6).

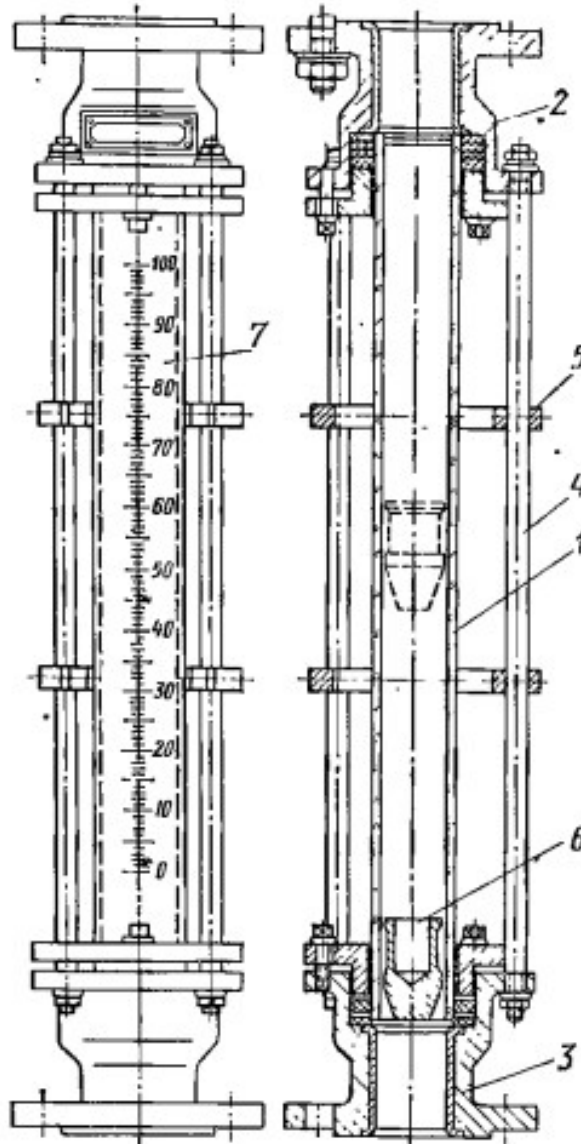


Рис. 3.6 – Ротаметр зі скляною конусною трубкою:

1 – скляна конічна трубка; 2,3 – металеві голівки; 4 – тяги; 5 – поперечини;
6 – поплавок; 7 – шкала.

Ротаметр зі скляною трубкою складається з конічної трубки 1, закріпленої в двох металевих голівках 2 і 3, забезпечених сальниками і фланцями для монтажу у вертикальному трубопроводі. Головки з'єднані декількома тягами 4, що утворюють разом з поперечиною 5 захисну решітку навколо скляної трубки. Всередині трубки 1 вільно переміщається поплавець 6,

що має форму дзиги. У нижній голівці є сідло, на яке опускається поплавець при припиненні потоку. Верхня головка забезпечена обмежувачем ходу поплавця. Сідло і обмежувач ходу не дозволяють поплавця вийти за межі скляної трубки. Шкала 7 приладу нанесена на поверхню скляної трубки, відлік ведуть по верхній горизонтальній площині поплавка.

У верхній частині поплавця іноді роблять косі прорізи, завдяки чому поплавок обертається навколо вертикальної осі. При обертанні поплавка центрується всередині трубки, не стикаючись зі стінками, його чутливість підвищується. За обертанням поплавка можна визначити стан приладу (відсутність тертя і засмічення).

Ротаметри зі скляною трубкою виготовляють на тиск рідини або газу не більше 0,58 МПа.

У техніці експерименту використовували ротаметр типу РС – 7. За результатами його градування представлений калібрований графік (рис. 3.6). За допомогою програми Excel по градуйованим даним за допомогою лінійної апроксимації отримана залежність:

$$(3.1)$$

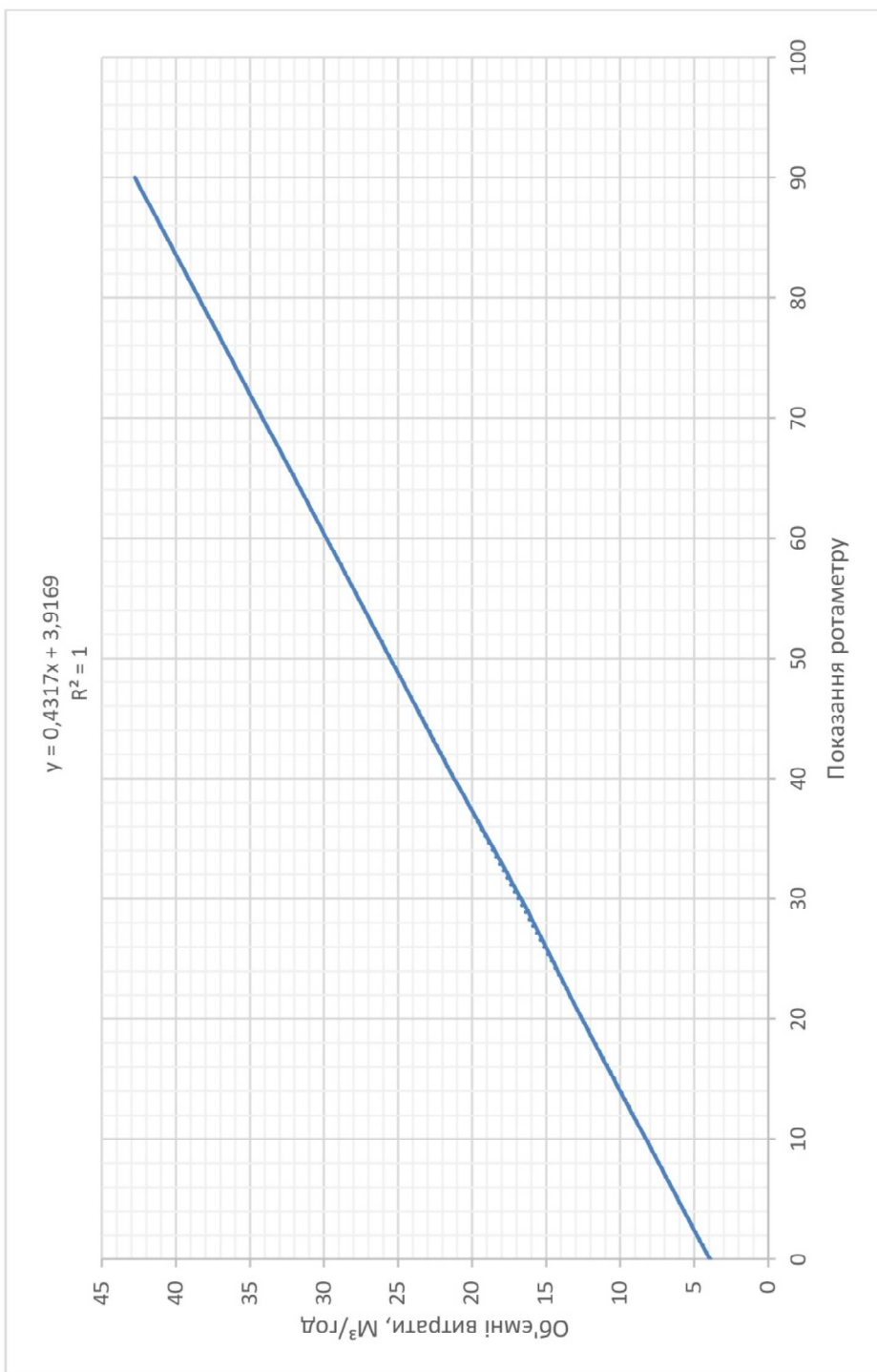
де N – число ділень;

$V_{гр}$ – об'ємні витрати повітря, м³/год.

Після розрахунку об'ємних витрат повітря за показаннями числа ділень ротаметру, ввели поправку, на виміри температури повітря та атмосферного тиску:

$$(3.2)$$

де ρ – густина повітря за робочих умов, кг/м³.



0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

3,95
8,27
12,58
16,69
21,21
25,52
29,83
34,15
38,46
42,77

Ри
с.
3.
7
–
Гр
ад
уй
ов
ан
а
ха
ра
кт
ер
ис
ти
ка
ро
та
ме
т

3.4. Експериментальне визначення коефіцієнту гідравлічного тертя порожнистого патрубку

Усю різноманітність трубопроводів умовно поділяють на короткі та довгі, які, в свою чергу, підрозділяють на прості та складні. У короткому напірному трубопроводі місцеві втрати напору сумірні з втратами напору за довжиною. До них відносять насадки, бензо- та маслопроводи, усмоктуючі трубопроводи насосних станцій, сифони та інше. Довгі напірні трубопроводи мають місцеві втрати напору незначні, які не перевищують 5-10 % від втрат напору за довжиною. До них відносять, наприклад, магістральні водопроводи. При розрахунку довгих трубопроводів знаходять втрати напору за довжиною, а потім збільшують їх на 5-10% [52]. В роботі проводили дослідження коефіцієнту гідравлічного опору короткої трубки, що була вбудована в стінку. Вся вказана конструкція містилась в експериментальному блоці (див. рис. 3.3). Основним об'єктом дослідження була металева трубка $\text{Ø} 32 \times 4$ мм довжиною 122 мм, яка встановлена в експериментальній блок. Основні розміри встановлення трубки в блок представлені на рис. 3.8.

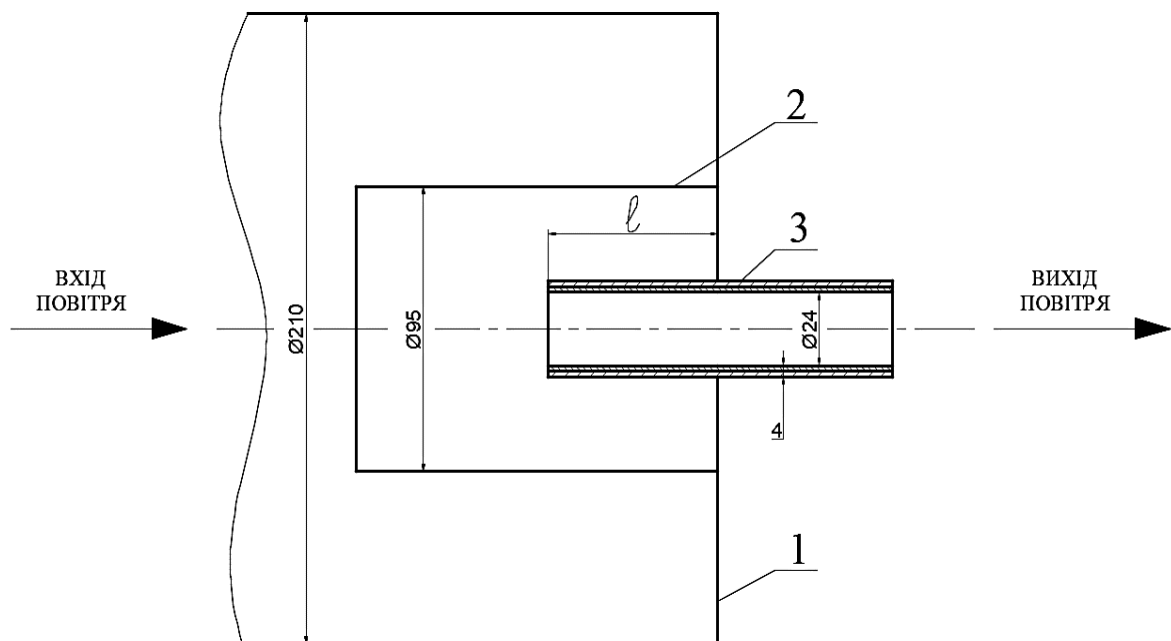


Рис. 3.8 – Схема розрізу експериментального блоку, основні геометричні розміри: 1 – корпус; 2 – стакан; 3 – дослідна трубка.

Ціль експерименту складалася з визначення гідравлічного тертя полої трубки, при її повздовжньому переміщені у напрямку руху повітря. Положення трубки фіксували довжиною l . Перед експериментом фіксували визначене положення трубки.

Дата проведення експерименту: 22.05.17

$P_{\text{роб.}} = 0,996 \cdot 10^5$ Па – атмосферний тиск;

$t_{\text{роб.}} = 16$ °С – робоча температура повітря;

$P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па – тиск при нормальних умовах;

$T_0 = 273$ К – абсолютна температура при нормальних умовах;

$\rho_{\text{роб.}} = 1,2024$ кг/м³ – густина повітря при робочих умовах;

$D_1 = D_2 = 0,024$ м – внутрішній діаметр короткої трубки;

$C=111$ – коефіцієнт Сатерленда;

$\zeta_{\text{вх.}}=0,5$ – коефіцієнт гідравлічного опору потоку повітря на вході в трубку;

$\zeta_{\text{вих.}}=1,0$ – коефіцієнт гідравлічного опору потоку повітря на виході з трубки;

l – довжина патрубка закріпленого в стінці апарату. (довжина l не впливає на коефіцієнт тертя λ^e .)

$L = 0,122$ м – довжина патрубка.

Результати первинних вимірів приведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1_Експериментальні дані

Число поділок	$l = 0,03\text{м}$	$l = 0,06\text{м}$	$l = 0,09\text{м}$
	$\Delta P, \text{Па}$	$\Delta P, \text{Па}$	$\Delta P, \text{Па}$
10	20	25	20
20	50	55	50
30	90	95	90
40	160	155	165
50	250	250	240
60	360	360	345

Первинні результати обробили за допомогою програми MathCAD, у порядку, який представлений нижче:

1. Густина повітря при нормальних умовах:

$$\rho_n, \text{ кг/м}^3. \quad (3.3)$$

2. Густина повітря при робочих умовах:

$$\rho, \text{ кг/м}^3. \quad (3.4)$$

3. Об'ємні витрати повітря згідно рівнянню градування ротаметру:

$$V, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.5)$$

4. Об'ємні витрати повітря при робочих умовах:

$$V_1, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.6)$$

5. Площа поперечного перерізу трубки:

$$S_1 = \frac{(\pi \cdot D_1^2)}{4}, \text{ м}^2. \quad (3.7)$$

6. Швидкість потоку повітря в короткій трубці:

$$W_1 = \frac{V}{S_1}, \text{ м/с}. \quad (3.8)$$

7. Коефіцієнт динамічної в'язкості повітря при робочих умовах:

$$\mu = \left[\mu_0 \cdot \frac{(273 + C)}{(T + C)} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{a}{2}} \right] \cdot 10^{-8}, \text{ Па} \cdot \text{ с}. \quad (3.9)$$

8. Коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря:

$$\nu, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (3.10)$$

9. Число Рейнольдса для порожнистої трубки:

$$Re_1 = \frac{(W_1 \cdot D_1)}{\nu}. \quad (3.11)$$

10. Для оцінки результатів розрахунку коефіцієнту гідравлічного опору порожнистої трубки проведено узгодження з рівнянням:

$$\zeta^p = \zeta_{\text{вх.}} + \zeta_{\text{тр.}} + \zeta_{\text{вих.}} \quad (3.12)$$

де $\zeta_{\text{вх.}}$ – коефіцієнт гідравлічного опору на вході в порожнисту трубку;

$\zeta_{\text{тр.}}$ – коефіцієнт гідравлічного опору, який обумовлений опором тертя в трубці;

$\zeta_{\text{вих.}}$ – коефіцієнт гідравлічного опору на виході потоку з трубки.

11.3 умови проведення експерименту витікає, що при відношенні

$$\frac{l}{D_1} = 1,25 \div 3,75 \quad \text{та} \quad \zeta_{\text{вх.}} = 0,5, \quad \text{а} \quad \zeta_{\text{вих.}} = 1,0 \quad [53], \quad \text{розрахунок} \zeta^e \text{ вели за}$$

рівнянням:

$$\zeta^e = \zeta_{\text{вх.}} + \lambda^p \cdot \frac{L}{D_1} + \zeta_{\text{тр.}} + \zeta_{\text{вих.}} \quad (3.13)$$

12. Розрахунковий коефіцієнт гідравлічного опору знаходили з рівняння:

$$\zeta_{\text{тр.}} = \lambda^p \cdot \frac{L}{D_1} \quad (3.14)$$

13. Відносна похибка розрахунку коефіцієнту гідравлічного опору:

$$\delta = \frac{\zeta^e - \zeta^p}{\zeta^e} \cdot 100\% \quad (3.15)$$

Результати зведені у табл. 3.2.

Табл. 3.2_Обраховані експериментальні дані

Чис. под.	l/D ₁	Експериментальні дані			Розрахункові дані					δ, %
		Re ₁	W ₁	ζ ^e	ζ _{вх.}	λ ^p	ζ _{тр.}	ζ _{вих.}	ζ ^p	
10	1,25	8152	5,0570	1,30	0,50	0,0333	0,17	1,0	1,67	-28,5
20		12426	7,7084	1,40		0,0300	0,15		1,65	-17,9
30		16701	10,3597	1,40		0,0278	0,14		1,64	-17,1
40		20975	13,0111	1,57		0,0263	0,13		1,63	-3,8
50		25249	15,6624	1,70		0,0251	0,13		1,63	4,1
60		29523	18,3138	1,79		0,0241	0,12		1,62	9,5
10	2,50	8152	5,0570	1,63	0,50	0,0333	0,17	1,0	1,67	-2,5
20		12426	7,7084	1,54		0,0300	0,15		1,65	-7,1
30		16701	10,3597	1,47		0,0278	0,14		1,64	-11,6
40		20975	13,0111	1,52		0,0263	0,13		1,63	-7,2
50		25249	15,6624	1,70		0,0251	0,13		1,63	4,1
60		29523	18,3138	1,79		0,0241	0,12		1,62	9,5
10	3,75	8152	5,0570	1,30	0,50	0,0333	0,17	1,0	1,67	-28,5
20		12426	7,7084	1,40		0,0300	0,15		1,65	-17,9
30		16701	10,3597	1,40		0,0278	0,14		1,64	-17,1
40		20975	13,0111	1,62		0,0263	0,13		1,63	-0,6
50		25249	15,6624	1,63		0,0251	0,13		1,63	0
60		29523	18,3138	1,71		0,0241	0,12		1,62	5,3

Аналіз даних у табл. 3.2 показав, що відносна похибка розрахункового та експериментального коефіцієнтів опору порожнистої трубки не перевищує 18 %.

В наступних експериментах для розрахунку коефіцієнту тертя буде застосована теоретична формула Блазиуса для гладких труб.

Слідє також відмітити незалежність положення трубки за довжиною осевого переміщення вмонтованої в стінку. Було прийнято рішення, що подальші досліді будуть проводитись при незмінному положенні трубки

$l = 0,06$ м. В результаті цього проведені додаткові досліді при $l = 0,06$ м. Первинні результати зведені у табл. 3.3.

Табл. 3.3_ Експериментальні дані

Порожнистий патрубок	
Число поділок	ΔP , Па
15	39
20	59
25	78
30	98
35	118
40	137
45	186
50	245

Оброблені результати по вище викладеному алгоритму приведені в табл.

3.4

Табл. 3.4_Обраховані експериментальні данні ($l = 0,06$ м).

Число поділок	l/D_1	Експериментальні дані			Розрахункові дані					$\delta, \%$
		Re_1	W_1	ζ^e	$\zeta_{вх.}$	λ^p	$\zeta_{тр.}$	$\zeta_{вих}$	ζ^p	
15	2,5	10364	6,3541	1,59	0,50	0,0314	0,16	1,0	1,66	-4,40
20		12517	7,6738	1,65		0,0299	0,15		1,65	0
25		14669	8,9935	1,59		0,0287	0,15		1,65	-3,77
30		16822	10,3133	1,52		0,0278	0,14		1,64	-7,89
35		18974	11,6330	1,44		0,0269	0,14		1,64	-13,89
40		21127	12,9527	1,35		0,0262	0,13		1,63	-20,74
45		23279	14,2724	1,51		0,0256	0,13		1,63	-7,95
50		25432	15,5922	1,66		0,0251	0,13		1,63	+1,81

3.5. Експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору діафрагми діаметром 10 мм

В даній роботі проводили дослідження гідравлічного опору діафрагми, що містилась у короткій трубці, яка, в свою чергу, була вбудована в стінку нової дослідної установки. Дослідна установка представляла собою ємність, в якій потік повітря завдяки декількох розворотів формував прямий профіль швидкостей та прямував до короткої трубки. Основним об'єктом дослідження була металева трубка $\varnothing 32 \times 4$ мм довжиною 122 мм з діафрагмою діаметром 10 мм [52].

Течія потоку через одиночний отвір діафрагми складається з двох фрагментів. Спочатку струмінь раптово звужується, а потім різко розширюється. В першій частині фрагменту течії втрати проявляються головним чином при розширенні струменю, яка зжата після входу з широкого каналу у вузький (рис. 3.9).

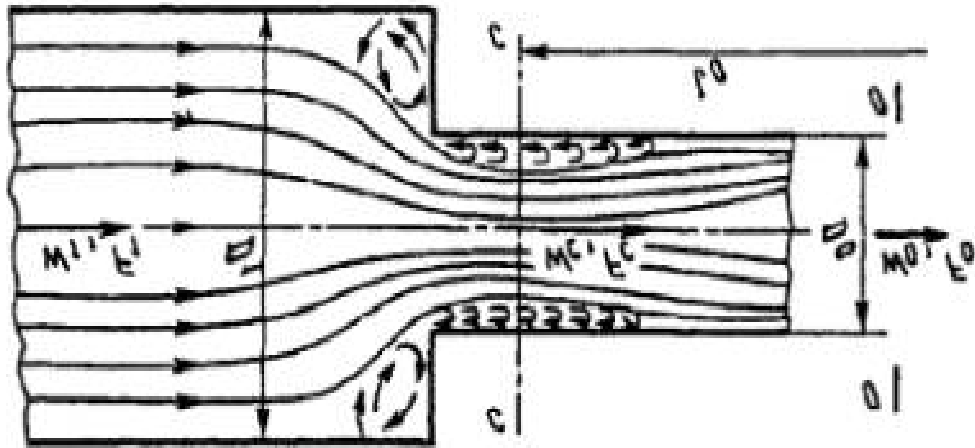


Рис. 3.9 – Раптове звуження потоку

При раптовому розширенні після виходу з діафрагми утворюється струмінь, віддалений від решти середовища поверхнею розділу, котра розпадається та згортається в потужні вихори, далі по довжині трубки протікає поступове розсмоктування вихорів та повне розтікання потоку по перерізу. Втрати на удар при раптовому розширенні пов'язані з вказаним утворенням вихорів на ділянці l_2 (рис. 3.10).

Провівши ряд експериментів отримані данні представили в табл.3.5. Діафрагма розташована по середині як показано на рис. 3.11.

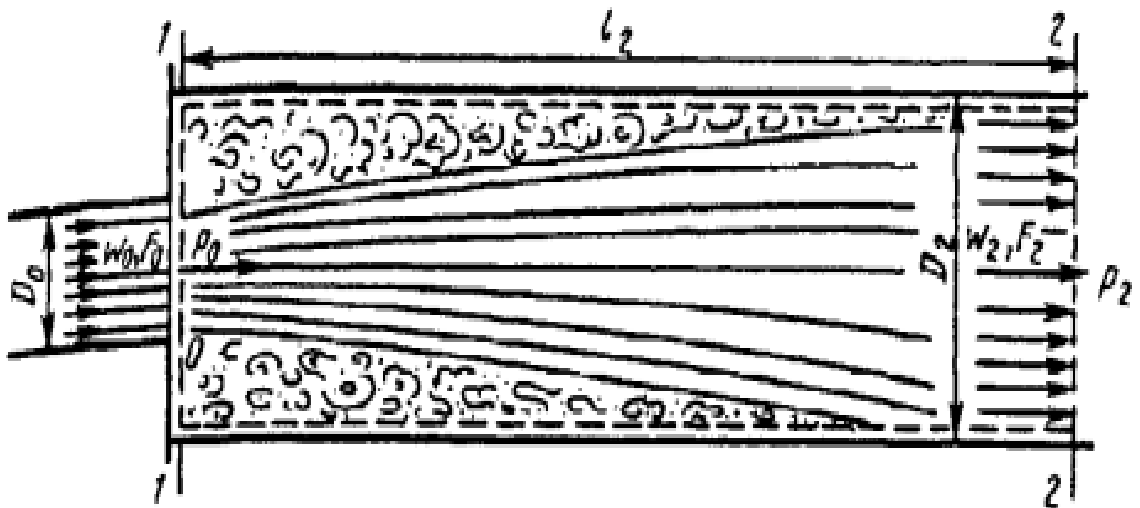


Рис. 3.10 – Раптове розширення потоку

Табл. 3.5_Експериментальні дані для діафрагми, поз. 2.1

Діафрагма, поз. 2.1	
Число поділок	ΔP , Па
15	1766
20	2531
25	3630
30	4934
35	6465
40	8191
45	10251
50	12312

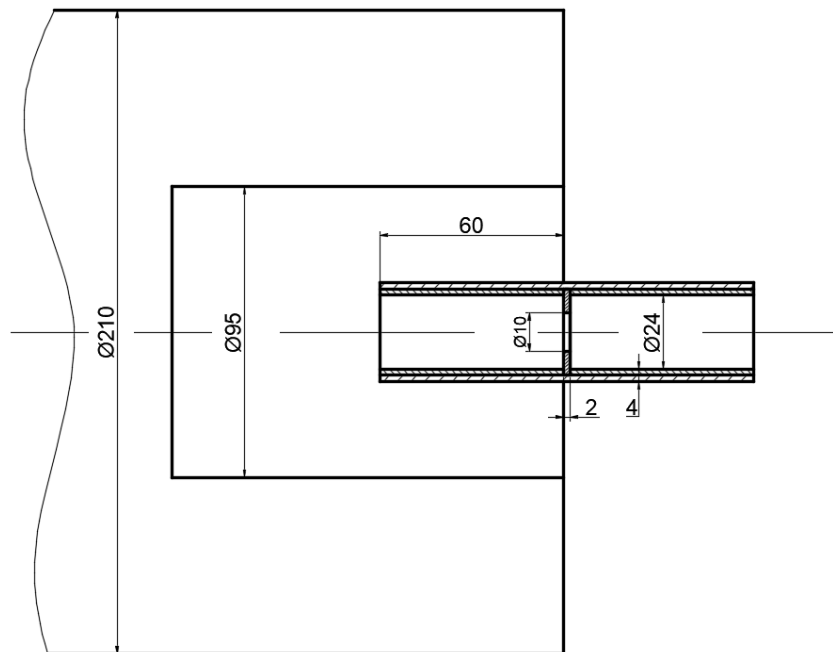


Рис. 3.11 – Схема установки короткого напірного патрубку та діафрагми в апараті

Дата проведення експерименту: 10.10.2017

$P_{\text{роб.}} = 1,005 \cdot 10^5$ Па – атмосферний тиск;

$t_{\text{роб.}} = 16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – робоча температура повітря;

$P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – тиск при нормальних умовах;

$T_0 = 273 \text{ К}$ – абсолютна температура при нормальних умовах;

$\rho_{\text{роб.}} = 1,2133 \text{ кг/м}^3$ – густина при робочих умовах;

$D_1 = D_2 = 0,024 \text{ м}$ – внутрішній діаметр короткої трубки;

$F_1 = F_2 = 5,76 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ – площа поперечного перетину трубки;

$\lambda = \lambda_0 = 0,02$ – коефіцієнт гідравлічного тертя отвору діафрагми;

$L = 0,122 \text{ м}$ – довжина трубки;

$l_0 = 0,002 \text{ м}$ – товщина діафрагми;

$D_0 = 0,010 \text{ м}$ – внутрішній діаметр діафрагми;

$\frac{l_0}{D_0} = 0,20$ – відношення товщини до внутрішнього діаметра діафрагми.

Данні експериментів обрахували за допомогою програми MathCAD за алгоритмом:

1. Густина повітря при нормальних умовах:

$$\rho_0, \text{ кг/м}^3. \quad (3.16)$$

2. Густина повітря при робочих умовах:

$$\rho, \text{ кг/м}^3. \quad (3.17)$$

3. Об'ємні витрати повітря згідно рівнянню градування ротаметру:

$$V, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.18)$$

4. Об'ємні витрати повітря при робочих умовах:

$$V_0, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.19)$$

5. Площа поперечного перерізу трубки:

$$S_0 = \frac{(\pi \cdot D_0^2)}{4}, \text{ м}^2 \quad (3.20)$$

6. Швидкість потоку повітря в короткій трубці:

$$W_0 = \frac{V}{S_0}, \text{ м/с}. \quad (3.21)$$

7. Коефіцієнт динамічної в'язкості повітря при робочих умовах:

$$\mu = \left[\mu_0 \cdot \frac{273 + C}{T + C} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot 10^{-6}, \text{ Па} \cdot \text{ с.} \quad (3.22)$$

8. Коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря:

$$\nu, \text{ м}^2/\text{с.} \quad (3.23)$$

9. Розрахунковий коефіцієнт тертя:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re_0^{0,25}}. \quad (3.24)$$

10. Число Рейнольдса для порожнистої трубки:

$$Re_0 = \frac{W_0 \cdot D_0}{\nu}. \quad (3.25)$$

11. Експериментальний коефіцієнт опору:

$$(3.26)$$

12. Розрахунковий коефіцієнт опору тертя:

$$\zeta^P = \left(\zeta_{\text{вх.}} + \lambda \frac{l_0}{D_0} + \zeta_{\text{вих.}} \right) \cdot \frac{\rho_{\text{р.у.}} \cdot W_1^2}{2}. \quad (3.27)$$

13. Відносна похибка розрахунку коефіцієнту гідравлічного опору:

$$\delta = \frac{\zeta^e - \zeta^P}{\zeta^e} \cdot 100\% \quad (3.28)$$

14. Розрахунковий коефіцієнт гідравлічного опору діафрагми визначили за рівнянням[53]:

$$\zeta_1 = \frac{\Delta P}{\frac{\rho W_1^2}{2}} = \left[0,5 \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^0 \cdot 75 + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^1 \cdot 375 + \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^2 + \lambda \frac{1}{D} \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2 \right] \quad (3.29)$$

де ΔP – гідравлічний опір діафрагми, Па; ρ – густина середина, $\text{кг}/\text{м}^3$; W_1 – швидкість середина у вхідній ділянці труби, $\text{м}/\text{с}$ F_0 – площа отвору діафрагми, м^2 ; F_1 – площа вхідної ділянки труби, м^2 ; F_2 – площа вихідної ділянки труби, м^2 ; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя отвору діафрагми; l_0 – товщина діафрагми, м ; D_0 – діаметр отвору діафрагми, м .

15. Коефіцієнт τ розраховували за рівнянням

$$\tau = (2,4 - \bar{l}) \cdot 10^{-\varphi(\bar{l})}, \quad (3.30)$$

де $\bar{l} = \frac{l_0}{D_0}$,

16. функцію $\varphi(\bar{l})$ знаходили з формули

$$\varphi(\bar{l}) = 0,25 + 0,535 \cdot \frac{\bar{l}^{-8}}{0,05 + \bar{l}^7}. \quad (3.31)$$

17. Для оцінки режиму течії знаходили число Рейнольдса

$$(3.32)$$

де W_0 – швидкість середі в отворі діафрагми, м/с; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середі, Па·с.

Табл. 3.6_Обраховані експериментальні данні

Чис. под.	Діафрагма, поз. 2.1						
	W_1 , м/с	Re_1	W_0 , м/с	Re_0	ζ^e	ζ^p	δ , %
15	6,3541	10364	36,5994	25009	70,193	69,1256	1,521
20	7,6738	12517	44,2011	30203	68,940		0,269
25	8,9935	14669	51,8027	35397	72,071		4,087
30	10,3133	16822	59,4043	40592	74,557		7,285
35	11,6330	18974	67,0060	45786	76,841		10,041
40	12,9527	21127	74,6076	50980	78,570		12,020
45	14,2724	23279	82,2092	56174	81,045		14,707
50	15,5922	25432	89,8108	61369	81,570		15,256

Встановлено, що дослідний коефіцієнт гідравлічного опору діафрагми, яка містилась у короткій напірній трубці склав для 10 мм – 69,1, що задовільно узгоджується з довідником[53], при цьому відносна похибка δ не перевищує для 10 мм – 16%.

3.6. Експериментальне визначення коефіцієнту гідравлічного опору короткого дифузора діаметром 10 мм

В даній роботі проводили дослідження гідравлічного опору дифузора, що містився у короткій трубці, яка, в свою чергу, була вбудована в стінку нової дослідної установки. Основним об'єктом дослідження була металева трубка $\varnothing 32 \times 4$ мм довжиною 122 мм з дифузorzом діаметром 10 мм. Гідравлічний опір заміряли диференційним манометром. Повітря на установку подавали компресором.

Течія потоку через одиночний отвір дифузора складається з двох фрагментів. Спочатку струмінь раптово звужується, а потім різко розширюється. В першій частині фрагменту течії втрати проявляються головним чином при розширенні струменю, яка зжата після входу з широкого каналу у вузький. У другій частині фрагменту течії при раптовому розширенні виникають так звані втрати на удар. При раптовому розширенні перетину утворюється струмінь, який відділяється від решти середні поверхні розділу, що розпадається та згортається у потужні вихори. Втрати на удар при раптовому розширенні зв'язані з вихроутворенням на даній ділянці. Таким чином, дві частини фрагментів течії струменів фізично накладаються один на одного. Коефіцієнт місцевого опору у випадку рівномірного розподілу швидкостей по перетину вузького каналу та турбулентній течії потоку головним чином залежить від відношення площин вузького та широкого перетинів [52].

Провівши ряд експериментів отримані данні представили в табл.3.7.

Табл. 3.7_Експериментальні дані

Число поділок	Дифузор, поз. 2.4	Дифузор, поз. 2.3	Дифузор, поз. 2.2
	ΔP	ΔP	ΔP
15	1874	1884	1982
20	2894	2796	2953
25	4081	3944	4169
30	5454	5513	5729
35	7171	7161	7603
40	9074	9006	9722
45	11497	11380	12243

Дифузор розташовується по середині як показано на рис. 3.12.

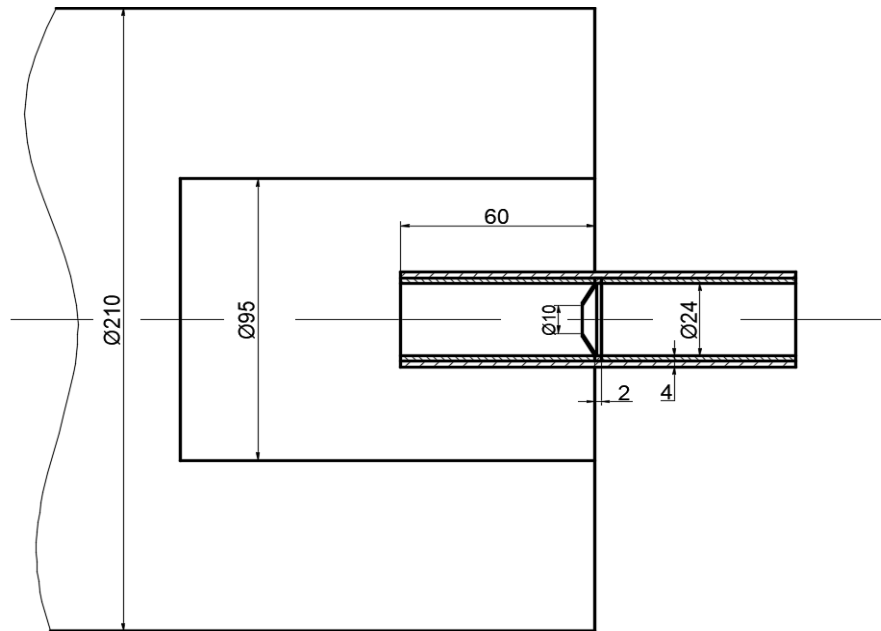


Рис. 3.12 – Схема установки короткого напірного патрубка та дифузора в апараті

Дата проведення експерименту: 10.10.2017

$P_{\text{роб.}} = 1,005 \cdot 10^5$ Па – атмосферний тиск;

$t_{\text{роб.}} = 16$ °С – робоча температура повітря;

$P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па – тиск при нормальних умовах;

$T_0 = 273$ К – абсолютна температура при нормальних умовах;

$\rho_{\text{роб.}} = 1,2133$ кг/м³ – густина при робочих умовах;

$D_1 = D_2 = 0,024$ м – внутрішній діаметр короткої трубки;

$L = 0,122$ м – довжина трубки;

$l_a = 0,002$ м – товщина діафрагми;

$D_0 = 0,010$ м – внутрішній діаметр діафрагми.

Данні експериментів обрахували програмою MathCAD за алгоритмом:

1. Густина повітря при нормальних умовах:

$$\rho_0, \text{ кг/м}^3. \quad (3.33)$$

2. Густина повітря при робочих умовах:

$$\rho, \text{ кг/м}^3. \quad (3.34)$$

3. Об'ємні витрати повітря згідно рівнянню градування ротаметру:

$$, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.35)$$

4. Об'ємні витрати повітря при робочих умовах:

$$, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.36)$$

5. Площа поперечного перерізу трубки:

$$S_0 = \frac{(\pi \cdot D_0^2)}{4}, \text{ м}^2 \quad (3.37)$$

6. Швидкість потоку повітря в короткій трубці:

$$W_0 = \frac{V}{S_0}, \text{ м/с}. \quad (3.38)$$

7. Експериментальний коефіцієнт опору:

$$. \quad (3.39)$$

Отримані результати, представлені у таблицях 3.8 – 3.10.

Табл. 3.8_Обраховані експериментальні данні

Числ. под.	Для полої трубки		Дифузор, поз. 2.4		
	W ₁ , м/с	Re ₁	W ₀ , м/с	Re ₀	ζ ^е
15	6,3541	10364	36,9682	24931	74,9610
20	7,6738	12517	44,6464	30109	79,4603
25	8,9935	14669	52,3246	35287	81,6209
30	10,3133	16822	60,0029	40466	82,9744
35	11,6330	18974	67,6810	45644	85,7991
40	12,9527	21127	75,3593	50822	87,6039
45	14,2724	23279	83,0375	56000	91,4864
50	15,5922	25432	-	-	-

Табл. 3.9_Обраховані експериментальні данні

Числ. под.	Для полої трубки		Дифузор, поз. 2.3		
	W_1 , м/с	Re_1	W_0 , м/с	Re_0	ζ^e
15	6,3541	10364	36,5994	24806	75,3693
20	7,6738	12517	44,2011	29959	76,7170
25	8,9935	14669	51,8027	35111	78,8289
30	10,3133	16822	59,4043	40263	83,8888
35	11,6330	18974	67,0060	45415	85,6773
40	12,9527	21127	74,6076	50567	86,9358
45	14,2724	23279	82,2092	55720	90,5396
50	15,5922	25432	-	-	-

Табл. 3.10_Обраховані експериментальні данні

Числ. под.	Для полої трубки		Дифузор, поз. 2.2		
	W_1 , м/с	Re_1	W_0 , м/с	Re_0	ζ^e
15	6,3541	10364	36,7831	24869	79,3704
20	7,6738	12517	44,4229	30034	81,1118
25	8,9935	14669	52,0627	35199	83,4144
30	10,3133	16822	59,7025	40364	87,2363
35	11,6330	18974	67,3422	45529	91,0613
40	12,9527	21127	74,9820	50694	93,9707
45	14,2724	23279	82,6218	55860	97,5232
50	15,5922	25432	-	-	-

Провівши експерименти з дифузорами, визначили експериментальний коефіцієнт опору. Графічна частина обрахованих експериментальних даних представлена у розділі 4.

4. УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Основною гідравлічною характеристикою сушарки є її гідравлічний опір. Від величини гідравлічного опору залежить вибір потужності насосу, або компресійної машини, а це впливає на експлуатаційні витрати. Розрахунок перепаду тиску в трубках, які вбудовані в розподільну тарілку можливий при відомому коефіцієнті опору розробленого розподільного пристрою, до конструкції якого входить короткий дифузор. Дифузори, які розташовані у розподільному пристрої, слугують для рівномірного розподілення потоку газу у сушильному апараті. Для подальшого розрахунку коефіцієнта гідравлічного опору дифузора представлені графічні залежності його від кута віддзеркалення, вхідного діаметра, довжини дифузора і т.д, представлені на рис. 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 та 4.7.

На рис. 4.1 зображено графік гідравлічного тертя порожнистого патрубку від числа Рейнольдса. Пряма лінія відображає середнє значення коефіцієнта тертя.

Графік гідравлічного тертя дифузора $\square 10$ від числа Рейнольдса при постійному куті нахилу, зображено на рис. 4.2. Зі збільшенням числа Рейнольдса коефіцієнт гідравлічного тертя зростає.

Графік залежності експериментального коефіцієнту гідравлічного опору дифузора $\square 10$ від кута віддзеркалення при постійному числі Рейнольдса в трубці, зображено на рис. 4.3. Кут віддзеркалення майже не впливає на коефіцієнт гідравлічного опору, а тенденція графіка є дугою наближеною до прямої лінії.

Графік залежності експериментального коефіцієнту гідравлічного опору дифузора $\square 10$ від довжини дифузора, зображено на рис. 4.4. Довжина дифузора при відношенні до постійного числа Рейнольдса, утворює дугу наближену до прямої лінії.

Графік залежності експериментального коефіцієнту гідравлічного опору дифузорів $\square 9$, $\square 10$, $\square 12$ від ступеня розширення при постійному куті віддзеркалення, зображено на рис. 4.5 – 4.7. При збільшенні діаметра дифузорів, коефіцієнт гідравлічного опору має менший діапазон значень, при однаковому числі Рейнольдса.

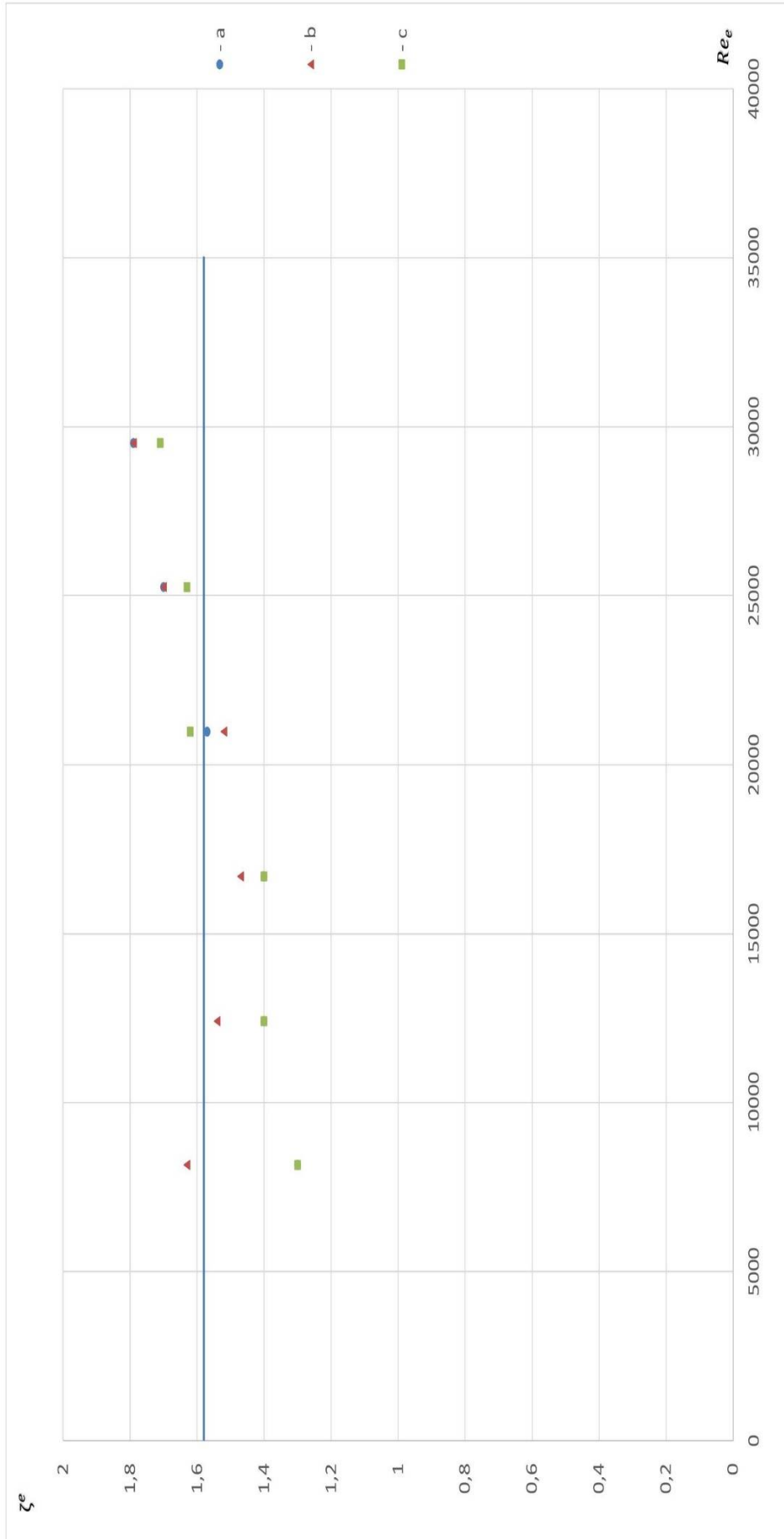


Рис. 4.1 –
Коефіцієнт
гідравлічного тертя
патрубка:

$$a - \frac{l}{D_1} = 1,25; b - \frac{l}{D_1} =$$

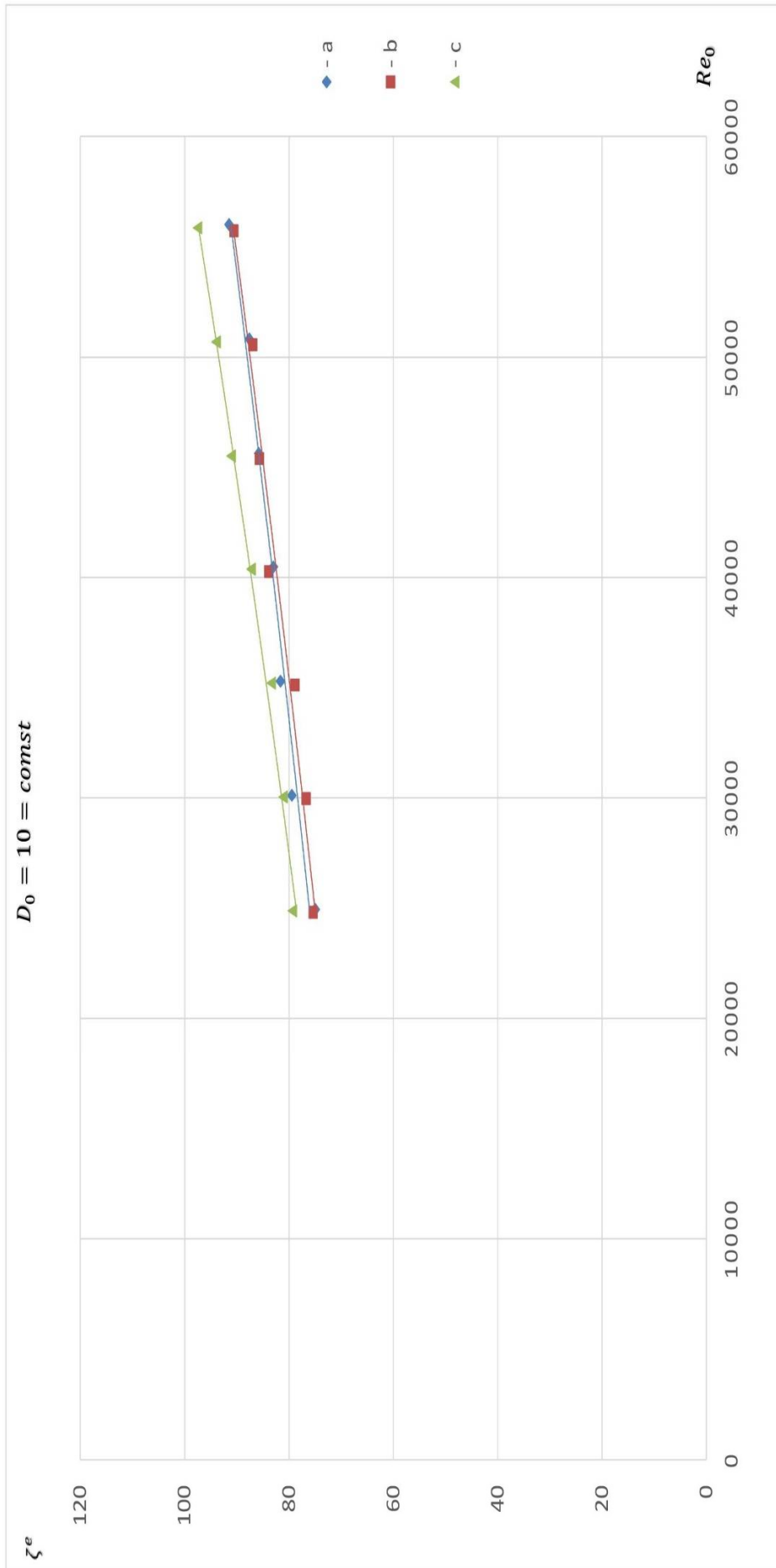


Рис. 4.2 – Залежність експандиційного коефіцієнта ζ^e від числа Рейнольдса Re_0 для дифузора $\Phi 10$ (поз. 2.2-2.4) при постійному куту відзеркалення $\alpha = 30^\circ$.

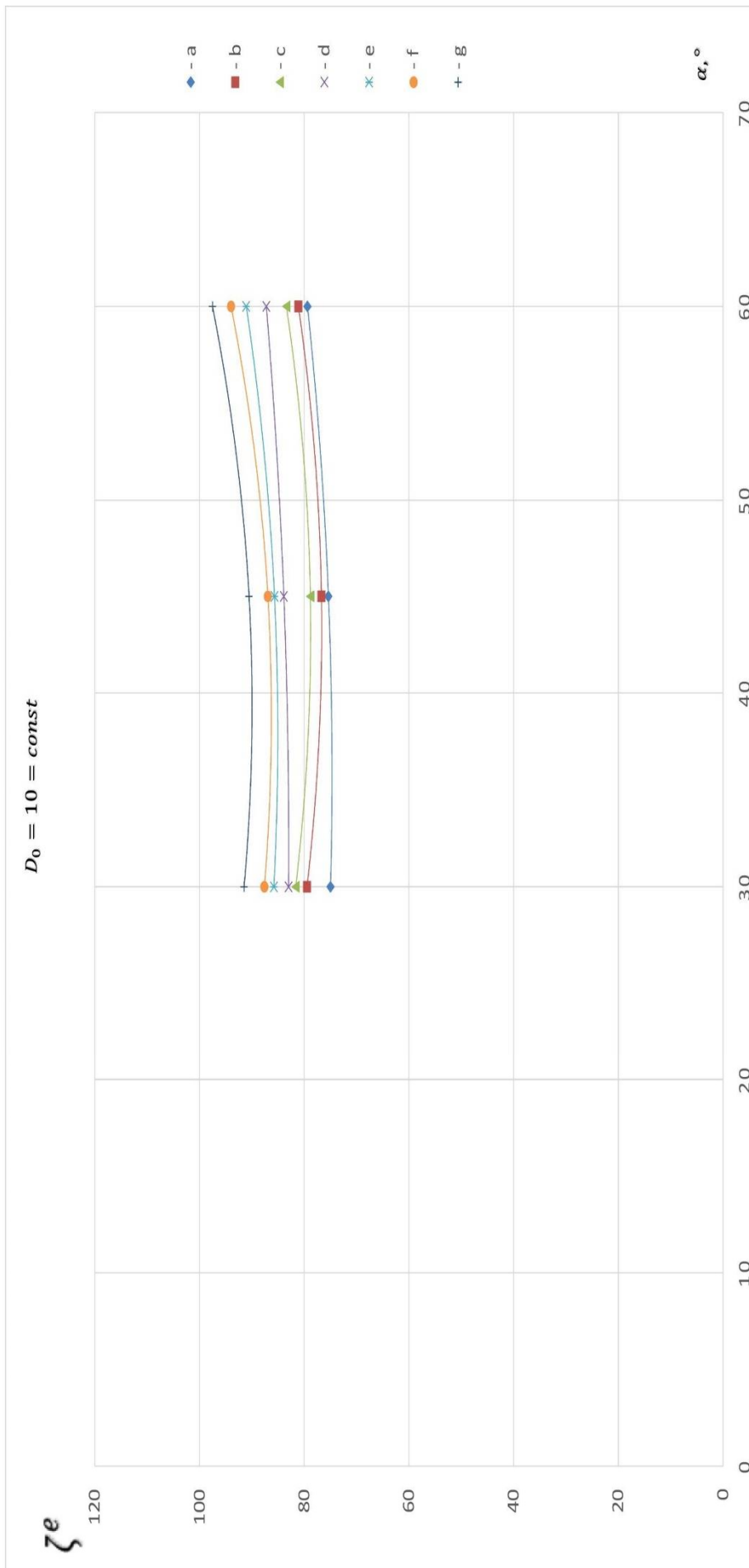


Рис. 4.3 – Залежність експериментального коефіцієнту гідравлічного опору

дифузора $\Phi 10$ (поз. 2.2-

2.4) від куту віддзеркалення при постійному числі Рейнольдса в трубці
 $a - Re_1 = 10364; b - Re$

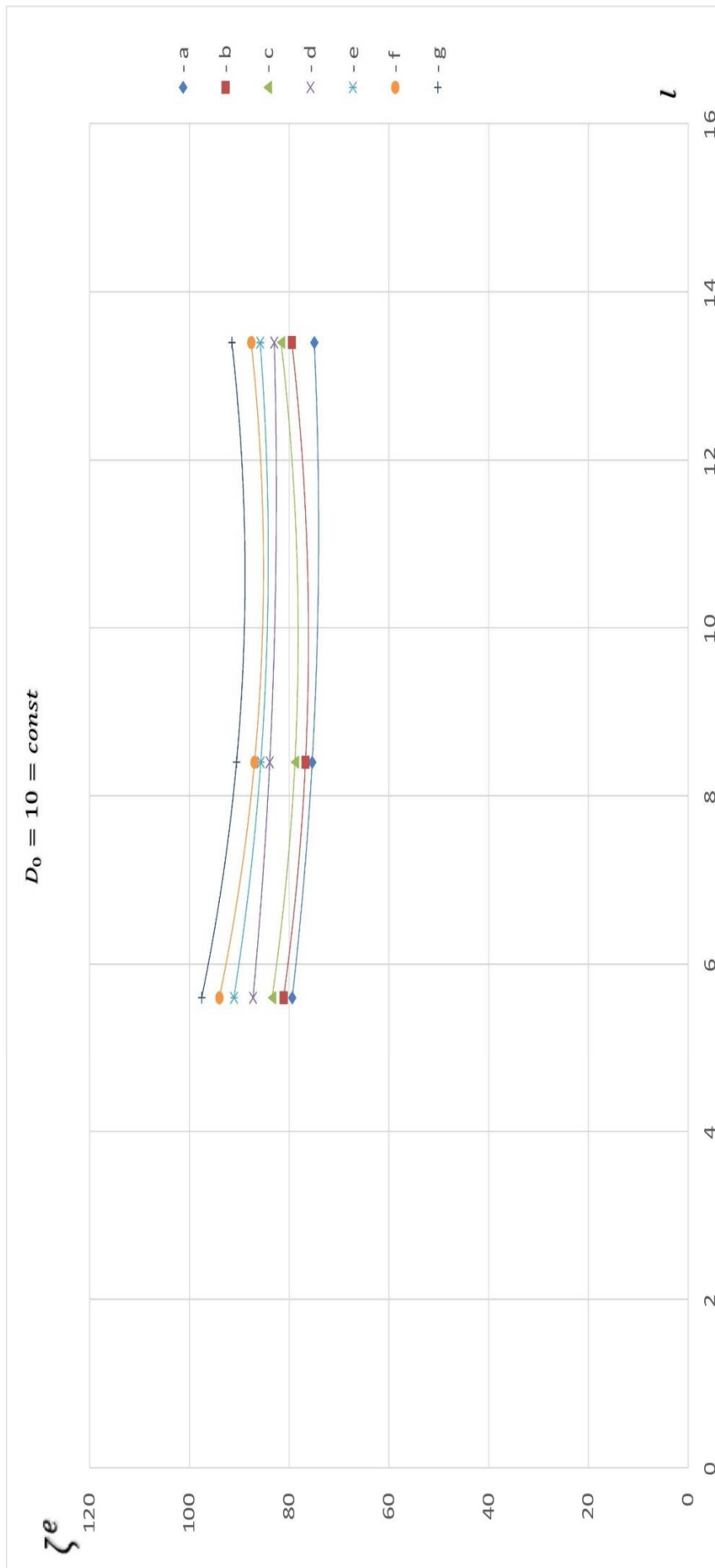


Рис. 4.4 – Залежність експериментального коефіцієнту гідравлічного опору

дифузора $\Phi 10$ (поз. 2.2-

2.4) від довжини дифузора при постійному числі Рейнольдса в трубці $a - Re_1 = 10364; b - Re_1$

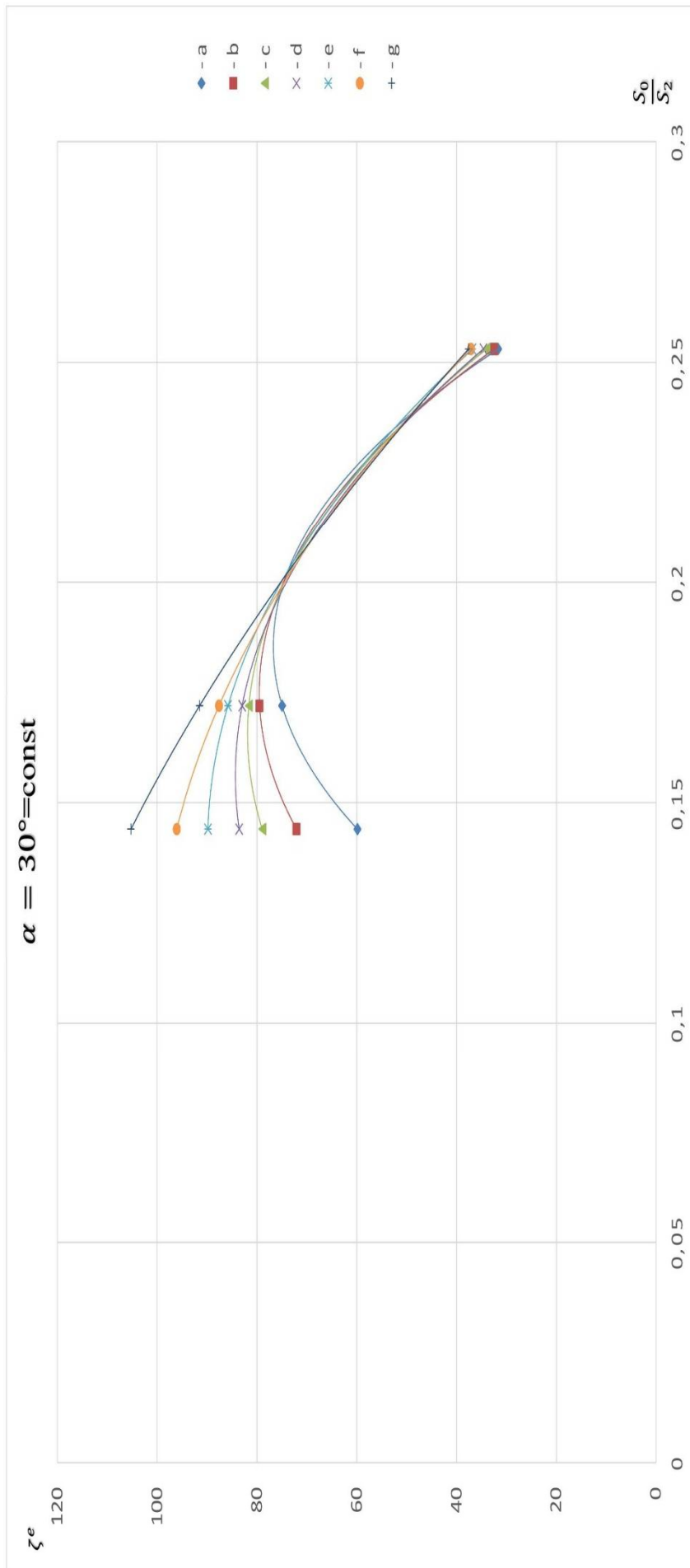


Рис. 4.5 –
 Залежність
 експериментального
 коефіцієнту
 гідравлічного опору
 дифузора (поз. 1.4,
 2.4, 3.4) від
 ступеня розширення
 при постійному куті
 віддзеркалення:
 $a - Re_1 = 10$

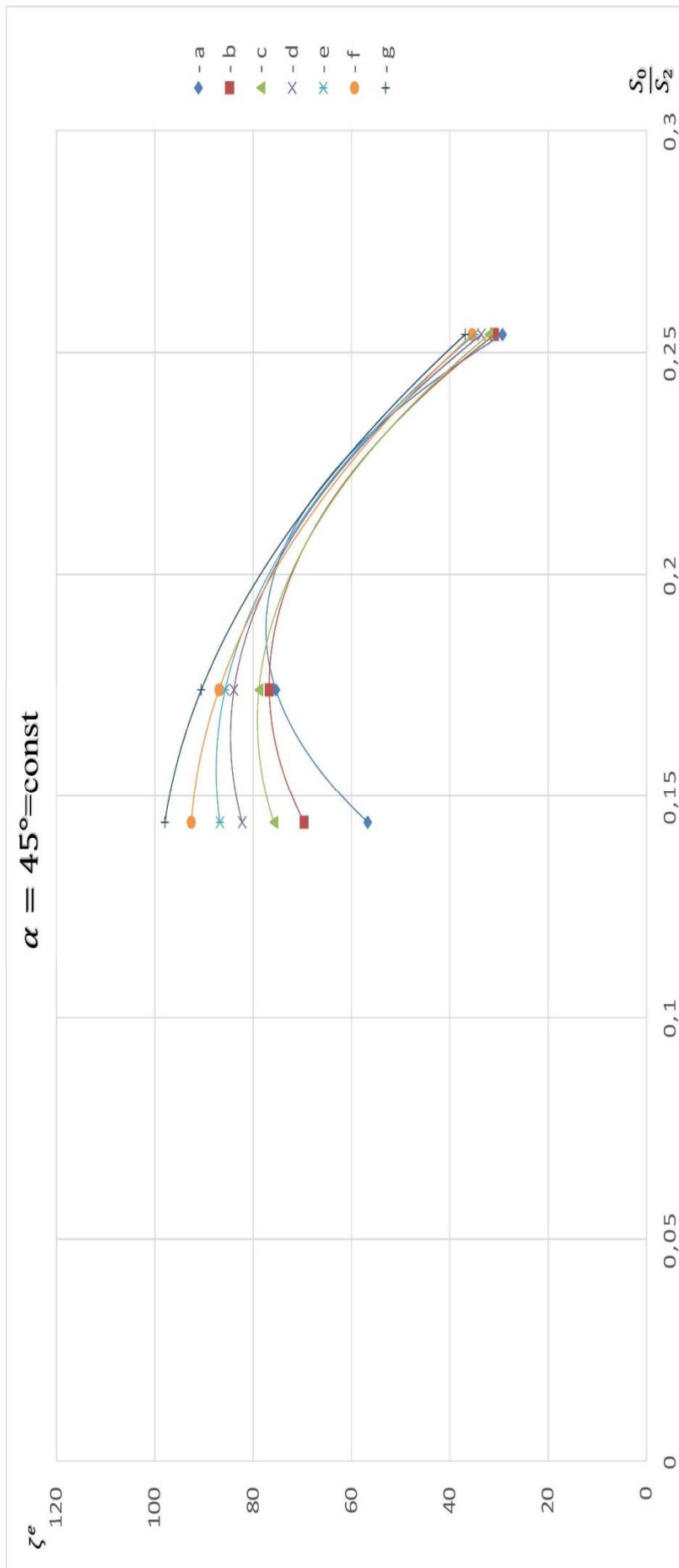


Рис. 4.6 – Залежність експериментального коефіцієнту гідравлічного опору дифузора (поз. 1.3, 2.3, 3.3) від ступеня розширення при постійному куті віддзеркалення:
 $a - Re_1 = 10364; b - Re_1$

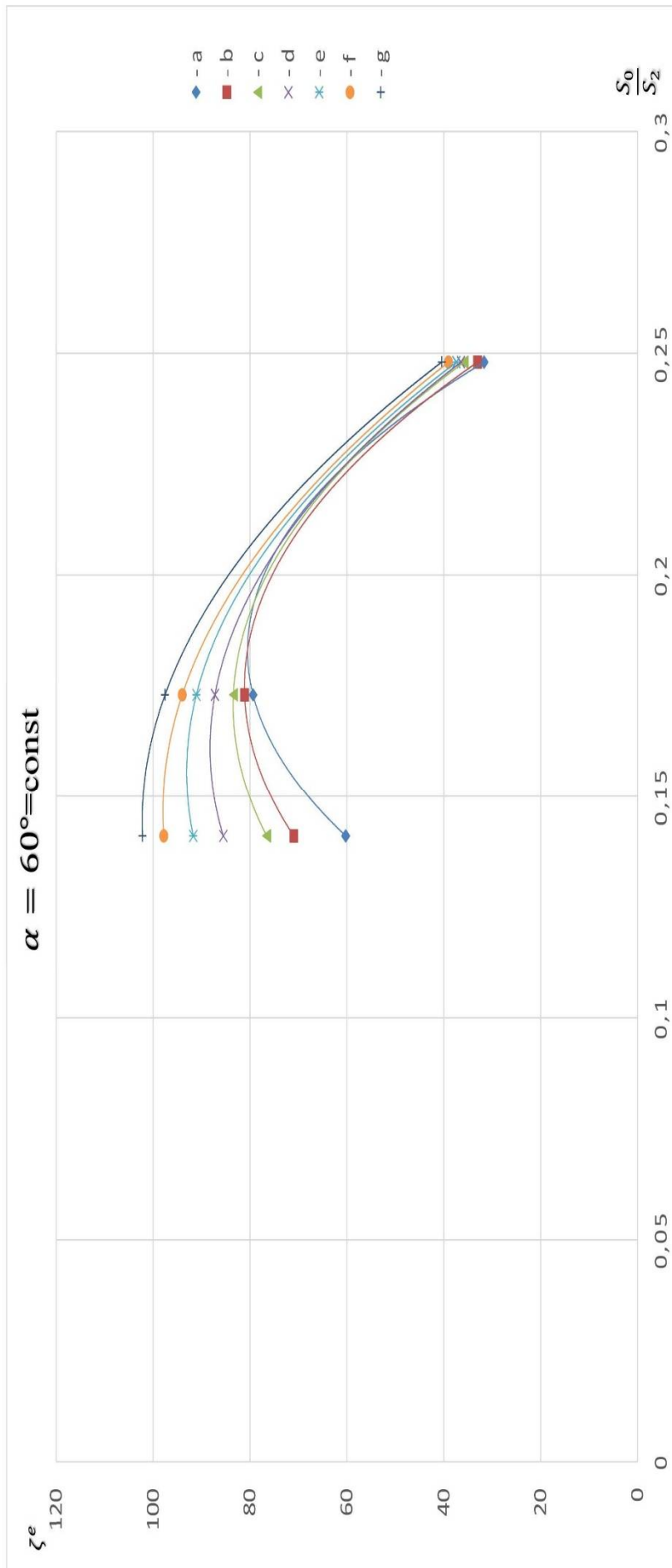


Рис. 4.7 – Залежність експериментального коефіцієнту гідравлічного опору дифузора (поз. 1.2, 2.2, 3.2) від ступеня розширення при постійному куті віддзеркалення:
 $a - Re_1 = 10364; b - Re_1$

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної роботи виконана задача: експериментальне дослідження коефіцієнту гідравлічного опору коротких дифузорів, що вмонтовані в короткий патрубок з подальшим прогнозуванням коефіцієнта гідравлічного опору інших типорозмірів коротких дифузорів. На підставі проведених експериментальних досліджень отримані наступні висновки:

1. Проведено літературний огляд процесу сушіння в псевдозрідженому шарі, конструкцій сушарок з метою виявлення негативних наслідків нерівномірності потоку на ефективність роботи сушарки можливістю створення у сушарці нового розподільника.
2. Розроблено новий розподільник пари (газу) та створено нову сушарку з псевдозрідженим шаром з розподільником у середині апарата, завдяки чому було вирішено проблему з боковим вводом пари (газу) в сушарку з псевдозрідженим шаром.
3. Розроблено схему експериментальної установки та конструкцію експериментального блоку, а також методику постановки і обробки експерименту для дослідження коефіцієнту гідравлічного опору коротких дифузорів, що вмонтовані у короткі патрубки. Порівняно експериментальні коефіцієнти гідравлічних опорів діафрагм з теоретично визначеними за літературними джерелами з метою визначення достовірності подальших результатів експериментів. Експериментально одержано коефіцієнти гідравлічного опору коротких дифузорів, що вмонтовані у короткі патрубки.
4. Представлено графічні залежності коефіцієнта гідравлічного опору дифузора від кута віддзеркалення, вхідного діаметра, довжини дифузора і т.д., для подальшого прогнозування коефіцієнта гідравлічного опору інших типорозмірів коротких дифузорів, що вмонтовані у короткі патрубки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ребу П., Кипящий слой, пер. с франц., под ред. Г. Я. Лейзеровича, ЦИИНцветмет, 1959.
2. Лева М., Псевдоожигение, пер с англ. под ред. Н. И. Гельперина, Гостоптехиздат, 1961.
3. Grohse E. W., AIChE Journal, 1, №3, 358 (1955).
4. Mathur K., Gishler P., J.Appl. Chem., 5, 624 (1955).
5. Филиппов М. В., Вопросы магнитной гидродинамики и динамики плазмы, Рига, 1962, стр. 637.
6. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Зайковский А. В., Хим. маш., № 3, 1 (1960).
7. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Гойхман И. Д., Хим. и нефт. маш., № 1, 13 (1964).
8. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Гойхман И. Д., Хим. и нефт. маш., № 5, 18 (1964).
9. Hatch L. P., Regan W. H., Powell J. R. ARS Journal, 31, № 4, 547, (1961).
10. Ластовцев А. М., Хвальнов А. М., Тр. МИХМ, 19, 125 (1959).
11. Ластовцев А. М., Хвальнов А. М., Макаров Ю. И., Хим. пром., № 11, 815 (1962).
12. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Романова Н. А., Хим. пром., № 11, 781 (1962).
13. Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Романова Н. А., Хим. пром., № 11, 823 (1963).
14. Идельчик И.Е., Хим. пром., № 6, 351 (1955).
15. Беранек Я., Сокол Д., Техника псевдоожигения, пер. с чешск. под ред. Н. И. Гельперина, Гостоптехиздат, 1962.
16. Горошко В. Д., Розенбаум Р. Б., Тодес О. М., Изв. вузов, Нефть и газ, № 1, 125 (1958).
17. Кругликов В. Я., Канд. дисс., Моск. нефт. ин-т им. И. М. Губкина, 1951.

18. Сеченов Г. П., Альтшулер В. С., Газ. пром., № 11, 12 (1958).
19. Сеченов Г. П., Альтшулер В. С., Тр. ИГИ АН СССР, № 11, 188 (1959).
20. Мухленов И. П., Трабер Д. Г., Румянцева Е. С., Померанцев В. М., ЖПХ, 34, № 6, 1181 (1961).
21. Кондуков Н. Б., в кн. «Конференция о технике псевдоожигенного слоя. Май – июнь 1961», CSVTS, Прага, 1962, стр. 127.
22. Кондуков Н. Б., Инж. – физ. журн., 5, № 3, 27 (1962).
23. Кондуков Н. Б., Докт. дисс., МИХМ, 1965.
24. Мартюшин И. Г., Канд. дисс., МИХМ, 1952.
25. Кириллов Н. И., ЖПХ, 18, № 7-8, 381 (1945).
26. Еркова Л. Н., Смирнов Н. И., ЖПХ, 29, № 10, 1484 (1956).
27. Забродский С. С., Гидродинамика и теплообмен в псевдоожигенном слое. Госэнергоиздат, 1963.
28. Bena J., Pavsky J., Kossaczsky E., Neuzyl L., Coll. Czech. Chem. Comm., 28, 293 (1963).
29. Bena J., Pavsky J., Kossaczsky E., Neuzyl L., Coll. Czech. Chem. Comm., 28, 555 (1963).
30. Richardson J. F., Zaki W. W., Trans. Instn. Chem. Eng. (London), 32, № 1, 35 (1954).
31. Шахова Н. А., Конференция «Применение кипящего слоя в химической промышленности» [Тезисы докладов], Изд. «Химия», 1965, стр. 28.
32. Шиманский Ю. В., Сыромятников Н. И., Инж. -физ. журн., 7, № 2, 25 (1964).
33. Гойхман И. Д., Канд. дисс., МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 1965.
34. Координационное научно-техническое совещание по сушке в химической и смежных отраслях промышленности, 1965.
35. Научно-техническая конференция «Применение кипящего слоя в химической промышленности» [Тезисы докладов], Изд. «Химия», 1965.
36. Применение кипящего слоя в народном хозяйстве СССР, изд. ЦНИИинф. и техн. –экон. исслед. мет., 1965.

37. Романков П. Г., Рашковская Н. Б., Сушка в кипящем слое, Изд. «Химия», 1964.
38. Сажин Б. С., Хим. пром., № 11, 830 (1962).
39. Vanesek V., Markvart M., Drbohlav R., «Fluidni suseni», SNTL, Praha, 1963.
40. Гельперин Н. И., Подгаецкая О. И., Дубинин М. К., в кн. «Применение кипящего слоя в народном хозяйстве СССР», изд. ЦНИИИнф. и техн.-экон. исслед. цвет. мет., 1965, стр. 246.
41. Schnell W., Chem.-Ing. Techn., 33, № 12, 849 (1961).
42. Гельперин Н. И., Кваша В. Б., Серегин Ю. М., Бычков Ю. Н., в сб. «Техника сушки во взвешенном слое», вып. 2, изд. ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1966.
43. Кураев Ю. П., Хохлов В. К., Эльперин И. Г., в кн. «Применение кипящего слоя в народном хозяйстве СССР», стр. 159, изд. ЦНИИИнф. и техн.-экон. исслед. цвет. мет., 1965.
44. Марушкин Б. К., Канд. дисс., Моск. нефт. ин-т им. И. М. Губкина, 1948.
45. Новиков И. И., Воскресенский К. Д., Прикладная термодинамика и теплопередача. М., 1961. 760 с.
46. Идельчик И. Е., Гидравлические сопротивления (физико-механические основы). М. 1954. 316 с.
47. Мигай В. К., Носова И. С., Уменьшение вихревых потерь в каналах. Теплоэнергетика. 1977. № 7. С. 49-51.
48. Носова М. М., Барнакова Т. С., Сопротивление входных и выходных отверстий в присутствии проходящего потока. Промышленная аэродинамика. 1959. № 15. С. 20-38.
49. Belik L., Chem.-Ing. Techn., 32, № 4, 253 (1960).
50. Патент СССР № 940829, 07.07.82. Бюл. № 25. Газораспределительная решетка для аппаратов кипящего слоя. / Ягуд Э. Л., Каим Г. А., Резников И. Л. и др.
51. Кулаков М. В., Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация и

комплексная механизация химико-технологических процессов»,—3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1983.— 424 с., "ил.

52. Технологія-2017 : XX матеріали міжнар.наук.-техн. конф., 21-22 квіт. 2017 р., м. Сєверодонецьк. / [укл. : Тарасов В.Ю.]. – Сєверодонецьк : [Східноукр. нац. ун-т ім. В. Даля], 2017. – 293 с.
53. Идельчик И. Е., Справочник по гидравлическим сопротивлениям/Под ред. М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.; Машиностроение, 1992.— 672 с.: ил.

