

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет

На правах рукопису

ГАЛІЧ РОМАН ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 621.928.93 (043.3)

ВПЛИВ ВИХІДНИХ ПРИСТРОЇВ НА ГІДРОДИНАМІКУ І
ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИХРОВИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

Спеціальність 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Якуба Олександр Родіонович

Суми – 2014

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	4
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ З ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ ВІД ПИЛУ	16
1.1 Основні джерела промислових викидів	16
1.2 Характеристики пилу	18
1.3 Сучасне обладнання для очищення повітря від пилу	19
1.4 Потенційні шляхи підвищення ефективності аспіраційних систем	22
1.5 Конструкції і принцип дії вихрових пиловловлювачів	23
1.5.1 Історія розвитку вихрових апаратів	23
1.5.2 Апарати прямоточного типу	27
1.5.3 Апарати із зустрічними закрученими потоками	31
1.5.4 Порівняльний аналіз вихрових апаратів	48
1.5.5 Розробка пиловловлювачів та аспіраційних систем	50
1.6 Висновки до першого розділу	53
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	55
2.1 Постановка задач дослідження	55
2.2 Типова конструкція циліндричного вихрового апарата	56
2.3 Методика дослідження вихрових апаратів	58
2.4 Експериментальні стенди та установки	60
2.4.1 Випробування на ефективність пиловловлювання	62
2.4.2 Випробування на енергетичні втрати	65
2.5 Методика обробки результатів досліджень	67
2.6 Висновки до другого розділу	70
РОЗДІЛ 3. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	71

3.1 Особливості гідродинаміки вихрових апаратів	71
3.2 Математичні моделі вихрових апаратів	72
3.2.1 Поле швидкостей	75
3.3 Розрахунок фракційної і загальної ефективності пиловловлювання	80
3.4 Розрахунок енергетичних втрат вихрових апаратів	85
3.5 Висновки до третього розділу	88
РОЗДІЛ 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	89
4.1 Оцінка впливу вихідних пристроїв на гідродинаміку, ефективність пиловловлювання та енергетичні втрати	89
4.1.1 Вихідний патрубок	89
4.1.2 Пиловбірний бункер	96
4.2 Висновки до четвертого розділу	101
РОЗДІЛ 5. КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРОБКИ ТА ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ВИХРОВИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ	102
5.1 Особливості створення промислових моделей вихрових пиловловлювачів	102
5.2 Загальна методика вибору і розрахунку циліндричних вихрових пиловловлювачів	104
5.3 Основні напрямки конструктивної модернізації вихрових пиловловлювачів	112
5.4 Напрямки поліфункціонального застосування вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками	118
5.5 Висновки до п'ятого розділу	120
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	124
ДОДАТКИ	142

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Геометричні розміри вихрового апарата

D_0	– діаметр сепараційної камери, м ;
r_0	– радіус сепараційної камери, м ;
r_1	– радіус витиснювача первинного завихрителя, м ;
r_2	– радіус завихрителя первинного потоку, м ;
$r_3 \approx r_*$	– радіус розмежування потенційного та вихрового потоків, м ;
r_4	– радіус вихідного патрубку, м ;
r, r_i	– поточний радіус, м ;
H	– висота сепараційної камери, м ;
z	– поточне значення висоти, м ;
a, b	– висота і ширина вхідного каналу завихрителя, м.

Параметри потоків

L_0	– загальна витрата повітря через апарат, м ³ /с ;
L_1	– витрата повітря через первинний канал, м ³ /с ;
L_2	– витрата повітря через вторинний канал, м ³ /с ;
V_z	– осьова складова швидкості, м/с ;
V_r	– радіальна складова швидкості, м/с ;
V_φ	– тангенціальна складова швидкості, м/с ;
ω	– кутова швидкість обертання потоку, с ⁻¹ ;
$\omega(z)$	– поточне значення кутової швидкості потоку, с ⁻¹ ;
C_0	– характерна швидкість обертання потоку у вихідному патрубку, с ⁻¹ ;

Θ	– параметр ефективного закручування потоку ;
n_p	– конструктивний параметр закручування на виході з завихрителя ;
ψ	– функція струму закрученого потоку ;
$\varepsilon = L_2 / L_1$	– співвідношення витрати повітря по вхідних каналах вихрового апарата ;
$k = L_2 / L_3$	– кратність витрати потоків ;
k_1	– коефіцієнт кореляції ;
ξ	– коефіцієнт гідравлічного опору ;
μ_2^t	– динамічна в'язкість газу, Па·с ;
ν_2	– кінематична в'язкість газу, Н·с/м ² ;
ΔP	– гідравлічний опір, Па ;
G	– масова витрата газу, кг/с ;
ρ^t	– густина газу в робочих умовах, кг/м ³ ;
a	– прискорення частинки пилу, м/с ² ;
R	– радіус устя сопла, м ;

Характеристика частинок пилу

F_u	– відцентрова сила, що діє на частинку ;
F_c	– сила лобового опору, Н ;
m	– маса, кг ;
$d_{u(e)}$	– еквівалентний діаметр частинки, мкм ;
$d_{50(m)}$	– медіанний (середній) розмір частинки пилу, мкм ;
ρ_u	– щільність матеріалу частинки пилу, кг/м ³ ;
σ_n'	– дисперсія розподілу твердих частинок ;
η_o	– загальна ефективність пиловловлювання, % ;
η_ϕ	– фракційна ефективність пиловловлювання, % ;

$Z_{вх}, Z_{вих}$	– запыленість потоку на вході та виході відповідно, $г/м^3$;
ε	– ступінь виносу пилу з вихрового апарата ;
ρ_2	– густина газу, $кг/м^3$;

Індекси

0	– відноситься до діаметра сепараційної камери ;
1	– відноситься до первинного потоку ;
2	– відноситься до вторинного потоку ;
3	– відноситься до загального потоку (вихідного патрубка) ;
<i>сер.</i>	– середній ;
<i>вх., вих.</i>	– вхід, вихід ;
z	– осьовий ;
r	– радіальний ;
φ	– тангенціальний ;
m (<i>max</i>)	– медіанний розмір частинок (максимальний розмір) ;
$ч$	– відноситься до частинки пилу.

Скорочення

ВАЗЗП	Вихровий апарат із зустрічними закрученими потоками
ВАЗЗПЦ	Вихровий апарат із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою
КММО	Контактний модуль мокрого очищення
ЄМ	Єдина методика порівняльних випробувань пиловловлювачів

ВСТУП

Актуальність теми. Проблеми захисту атмосферного повітря від забруднень твердими промисловими викидами і вирішення проблем технічного переозброєння багатьох галузей хімічної, металургійної промисловості та виробництв будівельних матеріалів є на даний час найважливішими екологічними проблемами, що зачіпають в тій чи іншій мірі всі країни світу. Необхідність вживання термінових і ефективних заходів з охорони довкілля закріплена 16 статтею Конституції України.

Згідно вимог Кіотського протоколу, до якого приєдналася і Україна, останнім часом значно зріс науковий і практичний інтерес до оперативного розв'язання існуючих та знову виникаючих екологічних проблем, пов'язаних з викидами промислових газів, що призводять до зростання парникового ефекту, у тому числі й запыошених потоків, проблем, які цілком або частково вирішуються за допомогою новітніх конструкцій сухих та мокрих пиловловлювачів відцентрового типу, призначених як для попереднього, так і санітарного очищення забруднених промислових викидів, зокрема, високопродуктивними і високоефективними циклонами та вихровими пиловловлювачами.

Технологічне обладнання природоохоронного призначення, зокрема аспіраційні установки для очищення забрудненого пилом повітря, на багатьох промислових підприємствах останнім часом інтенсивно піддаються корінній реконструкції з метою інтенсифікації процесів, що проводяться, підвищення перепускної здатності, зниження енергоспоживання, зменшення габаритів та витрат на технічне обслуговування. Ще більше джерел запыошених викидів потребують термінової реконструкції та модернізації.

На підприємствах хімічної галузі і виробництвах будівельних матеріалів проблеми знепыошання забруднених повітряних потоків вирішуються в основному за рахунок систем аспірації, до складу яких в

якості першого ступеня очищення залучаються апарати циклонного типу, загальна ефективність роботи яких на даний час вже не може цілком відповідати сучасним нормам промислових викидів [1–6]. Тому істотна конструктивна модернізація існуючих систем природоохоронного призначення, дослідження гідродинаміки та розробка апаратури нового покоління у сукупності з надійними інженерними методами вибору та розрахунку є актуальною задачею.

На відміну від однопоточних циклонів, які призначені виключно для здійснення одного процесу – сухого або мокрого очищення заповнених потоків, вихрові апарати із зустрічними закрученими потоками (ВАЗЗП), завдяки особливостям гідродинаміки (підвищеним якісним показникам, здатності до створення в них різних за характером і активністю керованих гідродинамічних режимів), можуть використовуватись для проведення багатьох, у тому числі і поєднаних технологічних процесів.

Більш надійне прогнозування ефективності роботи проєктованих сухих пиловловлювачів є важливою науково-технічною задачею. У більшості випадків чисто емпіричні методи розрахунків мають досить вузьку застосовність, часто не враховують найважливіших технологічних аспектів та геометричних параметрів апаратів, а також у достатній мірі гідродинамічну структуру потоків безпосередньо в сепараційній камері вихрового пиловловлювача.

Для проєктного розрахунку вихрового апарата при призначенні його для роботи в якості конкретного технологічного пристрою, потрібно мати відповідні початкові дані, до складу яких входять насамперед аеродинамічні параметри, у тому числі швидкості: осьові, радіальні, тангенціальні і кутові. Знання поля цих швидкостей, а також характер їх розподілу в робочому просторі вихрового апарата в залежності від конструктивних особливостей інших функціональних елементів, дає можливість на початкових стадіях проєктування мати більш вичерпну інформацію щодо характеру

гідродинаміки і, як кінцевий результат, більш якісних показників вихрового апарата в реальних умовах експлуатації.

Враховуючи, що чисто емпіричний пошук напрямків конструктивного удосконалення відцентрових пиловловлювачів (циклонів та ВАЗЗП) зазвичай не приводить до позитивних результатів, актуальними являються теоретичні дослідження гідродинаміки закручених потоків, а також глибоке вивчення характеру впливу на неї вихідних пристроїв. Важливі, але часто обмежені відомі дані щодо певної залежності гідродинаміки і ступеня ефективності пиловловлювання від режимно-конструктивних параметрів відцентрових апаратів, носять досить суперечливий характер і не дозволяють використати їх для практичного втілення. Необхідні більш поширені дослідження з визначення можливостей з підвищення ефективності пиловловлювання безпосередньо після вихідного патрубку вихрового апарата. Тільки загальна систематизація відомих і узагальнення нових даних, що базуються на теоретичних та експериментальних дослідженнях, дозволить вийти на більш високі техніко-економічні показники роботи відцентрових пиловловлювачів.

Зв'язок роботи з науковими темами. Робота має науково-прикладний характер і виконана у відповідності з науковим напрямком роботи кафедри процесів та апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв Сумського державного університету з проблем дослідження та розробки нових конструкцій знепилюючого обладнання у сукупності з планом проведення спільних робіт з ПАТ «Севєродонецький ОРГХІМ» з питань дослідження, створення та промислового впровадження вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою (ВАЗЗПЦ) (Договір про науково-технічне співробітництво № 51.18-01.13Н, 2013).

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка конструкції вискоелективного пиловловлюючого обладнання, створюваного на базі вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками для промислових підприємств різних галузей.

Поставлена мета досягнута шляхом вирішення наступних задач :

– вивчення впливу режимно-конструктивних параметрів вихідного патрубку на аеродинаміку і гідродинамічні характеристики, загальну ефективність сепарації та гідравлічний опір пиловловлювача моделі ВА33ПЦ (з циліндричною сепараційною камерою);

– вивчення впливу геометрії, побудови та умов експлуатації бункерної частини на основні параметри гідродинаміки в сепараційній камері вихрового пиловловлювача ;

– розробка математичної моделі, виходячи з закону збереження моменту кількості руху, з визначення полів швидкостей у вихровому апараті з циліндричною сепараційною камерою ;

– уточнення математичної моделі розрахунку фракційної ефективності ;

– дослідження ефективності пиловловлювання та енерговитрат у вихровому апараті з безперервним вивантаженням пилу ;

– визначення основних місць моделі ВА33ПЦ для конструктивного удосконалення ;

– визначення напрямків з конструктивної адаптації моделі ВА33ПЦ щодо використання її в якості технологічного обладнання для проведення інших окрім пиловловлювання технологічних процесів ;

– розробка інженерної методики вибору і розрахунку вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою і безперервним вивантаженням пилу.

Об'єкт дослідження – процес розділення фаз в механічних системах з запошеними повітряними потоками, зокрема, виділення частинок пилу під дією відцентрових сил у вихрових апаратах із зустрічними закрученими потоками.

Предмет дослідження – вплив основних режимно-конструктивних параметрів вихідних пристроїв на ефективність роботи вихрового апарата із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою.

Методи дослідження базуються на проведенні моніторингу ефективності роботи відцентрових пиловловлювачів на промислових підприємствах різних

галузей промисловості, де виникає технологічна потреба в очищенні відпрацьованих запилених потоків від забруднень, для чого використано : гідродинамічний метод для визначення полів швидкостей ; ваговий – для визначення ступеня очищення; дисперсний – для визначення гранулометричного складу уловлюваного пилу ; методи фізичного та математичного моделювання процесу розділення фаз в циліндричній камері. Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і результатів підтверджені коректним використанням сучасних методів математичної статистики, розрахунку похибок відхилень показів, теорії ймовірності при теоретичних дослідженнях і моделюванні динамічних процесів, значним обсягом дослідних даних, отриманих застосуванням відповідних засобів вимірювань і методів проведення експериментальних досліджень (спостереження, аналізу та синтезу), експериментальним підтвердженням моделей і методик розрахунків, отриманих в реальних умовах роботи обладнання. Методи активізації творчого процесу застосовані при створенні інноваційних конструкцій обладнання, зокрема, вихрового пиловловлювача з гвинтовою сепараційною камерою та контактного модуля мокрого очищення.

Наукова новизна полягає у визначенні умов для більш ефективної роботи вихрових пиловловлювачів із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою, створених на базі комплексних теоретичних, практичних і експериментальних досліджень, зокрема :

- вперше досліджено вплив вихідних пристроїв на гідродинаміку і ефективність роботи вихрових пиловловлювачів із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою ;

- показано, що аеродинамічні процеси, що відбуваються у вихідному патрубку, впливають на ефективність роботи та гідравлічний опір вихрового пиловловлювача з циліндричною сепараційною камерою і безперервним вивантаженням пилу ;

- визначені режими течій у вихідному патрубку залежно від ступеня закрученості повітряного потоку ;

– встановлено, що на ефективність роботи вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою впливають геометрія бункерної частини і надійність ущільнень в місці вивантаження пилу ;

– розроблена математична модель з визначення полів швидкостей в робочій зоні, заснована на законі збереження моменту кількості руху, що дозволяє з достатньою для технічних цілей точністю оцінювати величини складових швидкості у будь-якій точці сепараційного простору вихрового пиловловлювача з циліндричною сепараційною камерою ;

– уточнена математична модель гідродинаміки вихрового апарата ; отримані аналітичні вирази, які дозволяють прогнозувати рівень фракційної ефективності пиловловлювання ;

– визначені зони для конструктивної модернізації найбільш важливих функціональних вузлів вихрових апаратів з циліндричною сепараційною камерою і надана оцінка рівня їх впливу на ефективність сепарації ;

– встановлено, що рівень активності та особливості гідродинаміки вихрових апаратів з циліндричною сепараційною камерою дозволяють поширити область їх використання в якості технологічних апаратів для проведення інших окрім пиловловлювання процесів хімічної технології. Показано, що способами конструкційного удосконалення основних вузлів вихрових апаратів можна адаптувати їх для певного функціонального застосування в якості технологічних апаратів.

Практичне значення одержаних результатів. Розв’язані в дисертації задачі, отримані результати і використані методи досліджень дозволяють ставити та розв’язувати актуальні проблеми зі зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище, пов’язані з існуючими технологіями переробки твердих матеріалів на підприємствах різних галузей промисловості, де виникає потреба в очищенні запылених потоків.

Розроблена інженерна методика вибору і розрахунку вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою, яка дозволяє на

стадії проектування встановлювати основні режимно-конструктивні параметри, які у найбільшій мірі відповідають експлуатаційним вимогам.

Розроблена інноваційна конструкція вихрового пиловловлювача моделі ВАЗЗПЦ з циліндричною сепараційною камерою і безперервним вивантаженням пилу, на яку отримано патент на корисну модель.

Розроблена конструкція спеціального контактного модуля для використання в якості другого ступеня мокрого очищення після моделі ВАЗЗПЦ, на яку отримано патент на корисну модель.

За результатами проведених досліджень впроваджені у виробництво і пройшли експериментальну апробацію вихрові пиловловлювачі моделі ВАЗЗПЦ з циліндричною сепараційною камерою і безперервним вивантаженням пилу :

- у відділенні приготування шихти для виробництва скляних кульок на ТОВ «НВО Сєвєродонецький Склопластик» на лініях уловлювання доломіту і меленої крейди ;

- на аспіраційній лінії з уловлювання дрібнодисперсного пилу виробництва медичного засобу ізосорбїду динїтрату (порошкової субстанції) ТОВ «НВФ МІКРОХІМ» ;

- на ТОВ «Рубіжне–Агро» в якості обладнання для санітарного очищення повітря, що викидається в атмосферу після вібраційного сепаратора БСХ–100.

Впровадження вихрових пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ сприяло зниженню викидів шкідливого пилового забруднення у навколишнє середовище та поверненню у технологічний цикл цінних сировинних продуктів.

Матеріали дисертації використовуються у навчальному процесі при викладенні теоретичного курсу Розрахунок та конструювання в хімічному машино– та апаратобудуванні.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійним і цілком завершеним дослідженням автора в галузі процесів та апаратів

хімічних виробництв. Автор провів аналіз стану питання з очищення аерозолів вихровими пиловловлювачами з джерел утворення пилових викидів промислових виробництв, у тому числі металургійних та хімічних виробництв, а також підприємств будівельних матеріалів, розробив конструкції експериментальних стендів та установок, планував методику проведення досліджень. Автором проведений теоретичний аналіз та математичне моделювання руху частинок пилу в системі зустрічних закручених потоків, отримані аналітичні рівняння з визначення полів швидкостей та розрахунку фракційної ефективності пиловловлювання, на базі яких розроблена інженерна методика вибору і розрахунку вихрових пиловловлювачів, а також створені інноваційні конструкції вихрового апарата та пристрою, здатних з високою ефективністю вловлювати дрібнодисперсні частинки пилу, що підтверджено чисельними експериментальними і дослідно-промисловими випробуваннями. Постановка конкретних задач досліджень, питання математичного моделювання, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником. Особистий внесок автора в наукових роботах, опублікованих у співавторстві, наведений у списку робіт за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації обговорювалися на міжнародних та вітчизняних конференціях : VI Міжнародна науково-практична конференція “Наука і освіта 2003” (Дніпропетровськ, 2003); III Міжнародна науково-практична конференція “Динаміка наукових досліджень “2004” (Дніпропетровськ, 2004); Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне використання сировини, енерго- та ресурсозберігаючі технології у виробництві неорганічних речовин» (Черкаси, 2004); науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених “Технологія–2004” (Севєродонецьк, 2004); II Міжнародна науково-практична конференція «Дні науки–2006» (Дніпропетровськ, 2006); II Всеукраїнська науково-практична конференція

«Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем (Сєверодонецьк, 2012); VI Міжнародна науково-практична конференція «Економічні, екологічні та соціальні проблеми вугільних регіонів СНД» (Краснодон, 2013) ; науково-технічна конференція викладачів, співробітників, аспірантів і студентів факультету технічних систем та енергоефективних технологій (Суми, СумДУ, 2014).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано в 23 наукових працях : 13 статтях, із них 9 – у спеціалізованих виданнях, що входять до переліку МОН України, 2 – у спеціалізованих зарубіжних виданнях, 2 – в збірниках матеріалів конференцій, 8 публікацій тез доповідей в матеріалах конференцій, отримано 2 патенти на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел з 149 найменувань, 4 додатків на 12 сторінках. Повний обсяг дисертації становить 152 сторінки, серед яких 106 сторінок основного тексту, 38 ілюстрацій, 4 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ З ОЧИЩЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИКИДІВ ВІД ПИЛУ

1.1 Основні джерела промислових викидів

Хімічні виробництва. Практично на всіх виробництвах існують проблемні питання стосовно захисту навколишнього середовища від пилових викидів, що обумовлено специфікою технології переробки сипких речовин на всіх стадіях виробництва – підготовчих, проміжних та завершальних.

Значна кількість хімічних виробництв за якісним складом та рівнем шкідливості промислових викидів відноситься до третьої групи [1, 2], тобто є такими джерелами, що дають значні викиди нетоксичних речовин та інертних тіл, наприклад подрібнювачі, сушарки зваженого шару, пневматичний транспорт, системи завантаження та транспортування тощо. Крім того, джерелами пилових викидів є також грануляційні вежі виробництва аміачної селітри, колони карбонізації та вапняні печі содових заводів, виробництв напівпродуктів та барвників, печі киплячого шару виробництва калійних добрив, стеарату кальція тощо.

Виробництва будівельних матеріалів. Найбільш важливими з джерел утворення пилових викидів [3, 4] є цементні заводи, вапняні опалювальні печі, установки з виробництва магнезиту, менші за масштабами – печі опалювання цегли, видобувні кар'єри, виробництва ізоляційних матеріалів (вогнестійкої глини і т. і.), керамічні заводи та виробництва асфальту.

Джерела пилу цементних підприємств розділяють на дві групи. Перша містить ті технологічні процеси, куди входять шахтні та обертальні печі, охолоджувачі клінкеру, сировинні та цементні млини, сушарки шлаку тощо. До другої групи входять джерела, що здійснюють шкідливу дію в основному на атмосферне повітря підприємства та його найближче довкілля.

Особливо серйозні проблеми викликають процеси транспортування, завантаження-вивантаження-перевантаження, подрібнення, класифікації, змішування, дозування та упакування сипких матеріалів.

Наприклад, підвищене пиловиділення спостерігається при виробництві бетонної суміші: на ділянці змішувального відділення – до п'яти гранично допустимих концентрацій (ГДК), у надбункерному приміщенні – 1,5–2,0, у відділенні дозування робочої суміші – (3–4) ГДК.

Для арматурних цехів, а також виробництв нестандартних металевих конструкцій характерний пил металів та окалини, зварювальні аерозолі діоксиду вуглецю та марганцю. Пил металів і їх окалини виділяється при холодній обробці металу (різанні, гнутті, правці) і незначно (до 1,5 разів) перевищує санітарні норми.

При виробництві силікатної цегли підвищене пиловиділення спостерігається при завантаженні вапняку та піску кранами, дозуванні їх на стрічкові транспортери, транспортуванні, класифікації на вібраційних та повітряних грохотах, змішуванні у негерметизованих змішувачах, при пресуванні. На робочих місцях у приміщеннях підготовки суміші запиленість зазвичай перевищує санітарні норми від 2 до 20, а у формувальному відділенні – від 2 до 5 разів.

При виробництві кераміки та глиняної цегли найбільші пиловиділення перевищують ГДК: на складах глини – 1,5–2,5, піску – 5–7, у відділенні з підготовки суміші – 12–15, а у відділенні помелу шамоту запиленість сягає (30–32) ГДК. На ділянках завантаження та вивантаження матеріалів запиленість повітря у 2–3 рази перевищує допустимі концентрації.

На виробництві деревоволокнистих плит при різанні, фрезеруванні та шліфовці виділяється полідисперсний пил, концентрація якого у повітрі робочих зон перевищує санітарні норми у 1,5–3, а іноді – у 5–10 разів.

Виробництво цементу, вапна, доломіту, інертних матеріалів супроводжується на окремих ділянках особливо великим пиловиділенням,

перевищуючим ГДК у 5–10, а у деяких випадках до декількох десятків і майже сотень разів.

На виробництвах паперу та картонних виробів використовують активний мул у вигляді пресованих брикетів, який є відходом біологічного очищення стічної води багатьох хімічних виробництв.

В промисловості будівельних матеріалів перспективним є також використання склобою. Частково він витрачається на виготовлення склотари, інша частка – для виробництва декоративного склокераміту, виробів на керамічній основі (з глини та відходів скла), посипаних мілкою різнокольоровою скляною крихтою та доведених до розплаву в печі.

1.2 Характеристики пилу

Ефективність пиловловлюючого обладнання залежить насамперед від фізико-механічних властивостей та концентрації пилових матеріалів [3, 4]. При визначенні типу пиловловлювачів необхідно знати фізико-механічні властивості частинок пилу : геометричну форму частинок, їх дисперсність та розподіл за розмірами, рівень адгезійної та когезійної характеристик, абразивність, електричний опір та поверхневий заряд, природне походження та інші характеристики й особливості.

Форма, розміри та дисперсність частинок пилу можуть бути різноманітними в залежності від виду виробництва та походження пилу. Так, частинки мінеральної вати на ділянці підготовки насадки являють собою агрегати неправильної форми у вигляді пластівців глини та піску розмірами від 5 до 26 мкм, а при формовці – нитки довжиною 1 мм й більше. Пил глиняної цегли у формувальному цеху має вигляд пластівців глини та піску розміром (1–15) мкм, пил силікатної цегли – розміром (5–14) мкм. При виробництві залізобетонних виробів у бетонному вузлі утворюються частинки – агрегати суміші цеглового пилу та піску розмірами (4–20) мкм,

деревоволокнистих плит при обробці їх дисковими пилами – частинки продовгуватої форми розмірами (10–180) мкм.

На даний час певна кількість видів пилу різного походження для деяких галузей промисловості паспортизована [7]. У паспорті наведені всі характеристики, виходячи з яких можна вибрати та розрахувати відповідне пиловловлююче обладнання для конкретних умов експлуатації. Для продуктів хімічних та металургійних виробництв такі паспорти розроблені лише для обмеженої кількості об'єктів пиловловлювання, тому при розробці систем знепилювання для конкретних видів пилу такі характеристики отримують зазвичай у індивідуальному порядку з урахуванням специфічних умов промислового виробництва.

1.3 Сучасне обладнання для очищення повітря від пилу

Для вирішення проблем з захисту навколишнього середовища від пилових викидів на підприємствах хімічної, металургійної галузей та виробництвах будівельних матеріалів застосовується відповідне технологічне обладнання, правильний вибір і розрахунок якого залежить від методики, що використовується.

Слід зазначити, що у вказаних галузях проблеми з очищення забруднених повітряних потоків вирішуються практично однаково. Найбільш поширеними конструкціями обладнання, що використовується в якості пиловловлюючого, є інерційні апарати, циклонні (сухі і мокрі), рукавні фільтри, апарати пінного режиму та електрофільтри [1–6, 8–10]. Однак найбільше розповсюдження отримали сухі пиловловлювачі відцентрової дії – циклони [11], які мають широкий спектр конструктивного оформлення та областей застосування. Слід відзначити, що нині циклони все рідше застосовуються внаслідок збільшених вимог до ефективності їх роботи, а також через величезні обсяги газів, що підлягають очищенню.

Незадовільні чинники застосування електрофільтрів для очищення повітря : відносно мала перепускна спроможність, досить високий рівень питомих енерговитрат, займистість та вибухонебезпечність пилу, значні в часу коливання з витрати запилених потоків, а також просторові обмеження.

Мокрі скрубери не використовують, наприклад, для сепарації пилу, який утворює агломерати, обробки корозійноактивних газів або, при надто малій витраті, технічної води [10].

Рукавні фільтри досить погано працюють при підвищених температурах, пилу, що липне, особливо при високих концентраціях, при підвищеній вологості повітря, а також при певних просторових обмеженнях [6, 9].

Циклони повинні відповідати часто взаємовиключним вимогам, надійно працювати з оптимальною ефективністю при таких параметрах виробництва, що мають значні коливання відносно номінальних, часто змінюються у часі, з урахуванням відносно невисоких вимог щодо обслуговування та ремонту постійно діючих установок. Циклони мають бути стійкими до дії абразивного пилу, надійно працювати при високих температурах (до 1000°C), безперервно здійснювати накопичення та надійну евакуацію пилу, що липне, забезпечувати запобіжні засоби щодо вибуху займистого пилу, займати найменший просторовий об'єм.

Якщо за умовами технології виникає потреба у знепилюванні великих за обсягом потоків забрудненого повітря, то застосовують ряд особим чином паралельно встановлених циклонних елементів.

Найбільш важливі характеристики, що приймаються до уваги при виборі та оцінці типових циклонів :

- а) ефективність виділення частинок (фракційна та загальна);
- б) коефіцієнт гідравлічного опору (включаючи такі економічні чинники як металоємність, питомі енергетичні витрати);
- в) експлуатаційна надійність в реальних виробничих умовах.

Для оцінювання ефективності відділення частинок пилу слід, з урахуванням вище наведених важливих характеристик, здійснити групову компоновку циклонів.

Цей критерій є основним при виборі циклона, виходячи як з точки зору захисту навколишнього середовища, так і в технологічних цілях, наприклад для надійного заощадження цінних пилових продуктів. При цьому загальний коефіцієнт гідравлічного опору пиловловлюючої системи може бути оцінений як міра енергетичних втрат при вибраних перепускній спроможності та розмірах циклона, або збільшення габаритів та металоємності для даних перепускної спроможності та енергетичних втрат.

Типові циклонні пиловловлювачі об'єднують в чотири групи щодо до їх коефіцієнта ефективності сепарації. Перша група містить циклони з високою ефективністю пиловловлювання, друга – з середньою, третя – з низьким ступенем уловлювання (спроектовані для крупнодисперсного пилу або з установкою наступного ступеня очищення). Четверта група циклонів зарезервована для роботи в якості так званих передсепараторів, призначених для попереднього зниження концентрації частинок пилу середньої та крупної фракції перед подачею запиленого потоку на основну пиловловлюючу установку.

За останній час значно зросла кількість упроваджень пиловловлювачів другого покоління – вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками (ВАЗЗП) [12–16] замість типових циклонів, але поширення їх використання в промисловості на теперішній час обмежується внаслідок недостатньої вивченості особливостей гідродинаміки, впливу вихідних пристроїв на гідродинаміку та ефективність пиловловлювання, відсутністю надійної інженерної методики вибору і розрахунку, відносно невеликого досвіду їх проектування та конструкційного оформлення основних вузлів.

1.4 Потенційні шляхи підвищення ефективності аспіраційних систем

Проблема зниження рівня пилових викидів при умові раціональної технології та правильної експлуатації пиловловлюючих систем може бути вирішена, якщо для кожного конкретного випадку можна буде обгрунтовано вибрати такі одиночні пиловловлювачі або знепилюючі установки, які з найменшими витратами і, з урахуванням ефекту розсіювання в атмосфері, забезпечували б зменшення концентрації пилу у повітряному басейні промислового майданчика та населених пунктів до гранично допустимих величин (ГДВ). Можливість такого вибору залежить від наступних чинників [2, 17] :

1) створення уніфікованого ряду найкращих зразків пиловловлюючого обладнання ;

2) розробки та упровадження у практику проектування достовірних методів розрахунку ефективності роботи рекомендованих до застосування пиловловлювачів ;

3) наявності повноцінних відомостей щодо фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей проектного об'єкта і, насамперед, даних щодо дисперсного складу та концентрації.

Що стосується першої задачі, то вона на даний час знаходиться на стадії завершення, так як відповідними законодавчими організаціями з питань екології рекомендовані до широкого промислового застосування найефективніші, ґрунтовно досліджені і апробовані у промислових умовах типи циклонів та вихрових пиловловлювачів із зустрічними закрученими потоками [12, 15, 16] та апаратів мокрого очищення.

Друга задача вже частково вирішена. Численні розробники технологічної апаратури природоохоронного призначення зобов'язані ретельно обґрунтовувати інженерні методи розрахунку рекомендованих до застосування пиловловлювачів.

Розв'язання третьої задачі знаходиться на шляху, якому поки що не видно кінця, що обумовлено як трудомісткістю робіт з визначення фізико-хімічних властивостей пилу, так і виключно великою кількістю її видів. Ця проблемна задача може буде успішно вирішеною лише при визначенні для кожного з пилових матеріалів гранично допустимих викидів (ГДВ), які для деяких галузей промисловості вже обмежені, але на даний час ця робота продовжується дуже повільно.

У цій величезній та складній роботі сумісно з виробничими підприємствами та інжинірінговими компаніями та фірмами будь-якої форми власності мають брати участь і галузеві науково-дослідні інститути НАН України, а також провідні навчальні заклади – університети та інститути, в яких зібрані наукові і інженерні кадри вищої кваліфікації [15–16, 18–19].

Метою дисертаційної роботи є дослідження гідродинаміки і розробка високоефективного обладнання для очищення запилених потоків на базі багатофункціональних вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками, а також розробка інженерної методики вибору і розрахунку.

1.5 Конструкції і принцип дії вихрових пиловловлювачів

1.5.1 Історія розвитку вихрових апаратів

З різновидів пиловловлювачів відцентрової дії вихрові апарати мають найкоротшу біографію, дослідження гідродинаміки та конструювання їх почалися з середини 50-х років минулого століття в Німеччині.

Перша ідея вихрового пиловловлювача (ВП) виникла при проведенні дослідів з коагуляції деяких видів пилу в закручених (вихрових) потоках. В процесі дослідження за певних умов дослідів був виявлений ефект осадження дрібнодисперсних частинок пилу на стінки лабораторної моделі апарата. Німецьких дослідників Е. Шауфлера і Х. Ценнека зацікавив цей ефект, вони виготовили і випробували першу модель ВП з номінальною витратою повітря близько $12 \text{ м}^3/\text{год}$. Автори запатентували ідею і почали всебічні

дослідження нового пиловловлювача, результати яких були опубліковані в 63–65 роках минулого століття, і свідчили про перспективність інноваційної розробки. Відомі на даний час основні концептуальні варіанти вихрових пиловловлювачів у їх розвитку можна прослідкувати по рис. 1.1.

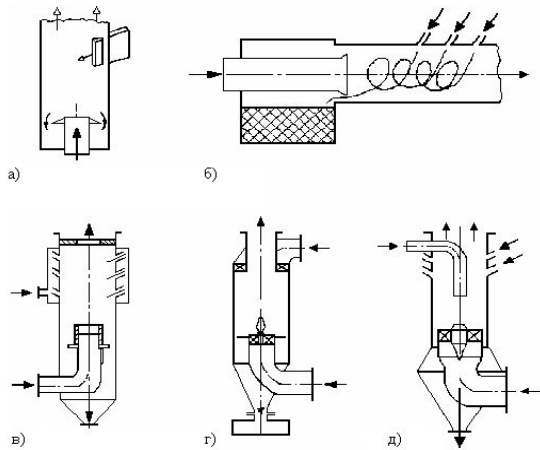


Рис. 1.1 – Основні концепції конструктивного оформлення вихрових апаратів із вторинним потоком газу

Перші практичні спроби використовувати закручений потік повітря для осадження дрібнодисперсних частинок пилу були проведені на моделі діаметром 0,075 м, а для відпрацювання режимно-конструктивних параметрів була виготовлена модель з діаметром сепараційної камери 0,2 м (рис.1.1, а), яка вважається першою конструкцією вихрового апарата із вторинним потоком газу. Запилений потік подавався прямою по осьовому патрубку знизу вгору, в сепараційній камері закручувався потоком чистого повітря, що надходив через хордально встановлене й нахилене до осі сопло. На цій конструкції апарата були відпрацьовані геометричні співвідношення розмірів та основних параметрів функціональних елементів : площа перерізу та кут нахилу сопла, висота сепараційної зони. На моделі $D_a = 0,45$ м заввишки $H = 3$ м, причому горизонтально орієнтованій (рис. 1.1, б), була передбачена вже змінна кількість сопел [21, 22].

Подальші дослідження дозволили внести деякі важливі конструктивні удосконалення. Так, при прямоочній подачі первинного потоку по осі апарата, його закручування здійснювалось вгору через загальний колектор розподілений сопловим вводом вторинного потоку. При цьому були визначені оптимальні параметри потоків та висота сепараційної камери (рис.

Перші практичні спроби використовувати закручений потік повітря для осадження дрібнодисперсних частинок пилу були проведені на моделі діаметром 0,075 м, а для відпрацювання режимно-конструктивних параметрів була виготовлена модель з діаметром сепараційної камери 0,2 м (рис.1.1, а), яка вважається першою конструкцією вихрового апарата із вторинним потоком газу. Запилений

1.1, в). Закрутка первинного потоку за допомогою розеточного завихрителя і подача назустріч йому вторинного потоку, тепер вже у вигляді зосередженого (рис. 1.1, г), було революційним технічним рішенням. Цю конструкцію вважають першою моделлю апарата із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою. У подальшому за базову була прийнята модель вихрового апарата (ВА) із розподіленим сопловим вторинним потоком (рис. 1.1, д) і подачею зверху ще й третього потоку, який на думку дослідників сприяв витісненню дрібних частинок пилу до стінки сепараційної камери.

За кінцевими результатами лабораторних випробувань були зроблені важливі висновки. По-перше, що просторова орієнтація сепараційної камери пиловловлювача практично не впливає на загальну ефективність пиловловлювання. По-друге, що збільшення діаметру сепараційної камери, у порівнянні з першими моделями, не спричинило за собою істотного зниження загальної ефективності роботи пиловловлювача. По-третє, що збільшення кількості сопел вторинного повітря сприяє значному підвищенню ефективності сепарації частинок пилу та зниженню питомих енергетичних витрат.

Наступні випробування моделі апарата з діаметром сепараційної камери $D_a = 0,500$ м на електростанції копальні «Bergmannsgluk» [23, 24] були вже напівпромисловими. Апарат був розрахований на загальну витрату запиленого повітря $L_0 = 2000$ $\text{м}^3/\text{г}$, а для подачі вторинного потоку використовувалося вже 9 сопел з умовним прохідним перерізом $d_y = 30$ мм. При перепаді тиску вторинного повітря $p = 2000$ Па і вхідній концентрації пилу $z_{\text{ex.}} = 20$ $\text{г}/\text{м}^3$ була досягнута загальна ефективність пиловловлювання на рівні $\eta = 90$ %.

Подальші систематичні лабораторні дослідження різних моделей вихрових апаратів із вторинним потоком [25] дозволили винайти більш вдосконалений пиловловлювач з діаметром сепараційної камери $D_a = 0,5$ м,

розрахований вже на продуктивність $L_0 = 4000 \text{ нм}^3/\text{год}$. У порівнянні з попереднім варіантом нова конструкція ВА була постачена декількома соплами зі змінною геометрією і різними кутами нахилу.

За результатами подальших досліджень фірма «Luftpoldhutte A.G.» випускала типорозмірний ряд ВА, які конструктивно схожі з однопоточними циклонами, проте потоку запоорошеного повітря надавалось додаткове обертання вторинними струменевими потоками з системи нахилених сопел.

Пиловловлювач із вторинним потоком газу (рис. 1.1, в), був запатентований фірмою «Siemens A.G.», а по ліцензії цієї фірми «Lufttechnik Vaurenth» і американська «Aeradyne Development» на той час виготовляли типорозмірний ряд ВА прямоточного типу. Серійно ВА виготовлялися і в інших країнах світу – США, Франції, Іспанії, Мексиці та Чехословаччині, де найбільше розповсюдження вони одержали в хімічній та харчовій промисловості для очищення запиленних потоків після сушарок зваженого шару, млинів та змішувачів, а також у гірничодобувній промисловості.

За результатами подальших досліджень, що проводились як вітчизняними так і зарубіжними авторами [26–33, 35–37, 119], з метою підвищення сепараційної ефективності і зниження питомих енерговитрат, були запропоновані певні інноваційні удосконалення основних функціональних елементів ВА [38–45]. Найбільш важливі з них : подача первинного потоку через завихритель ; заміна соплової подачі вторинного потоку під великим тиском подачею через розподілений вхід з рядом тангенціальних сопел ; використання в якості вторинного потоку частки запиленого газу тощо.

У 70-х роках минулого століття в СРСР роботу ВА різних конструкцій досліджували у Московському текстильному інституті, у Сумському національному аграрному університеті (СНАУ) під керівництвом д.т.н., професора Якуби О. Р., Інституті хімічних технологій (ІХТ, м. Рубіжне) Східно-Українського національного університету, а також в галузевому науково-дослідному і проектному інституті Черметенергоочистка

(ВНПІЧЕО, м. Харків). Найбільш істотні та позитивні результати були отримані вченими з МТІ, СНАУ та ІХТ, якими були досліджені, розроблені та упроваджені у багатьох галузях вітчизняної промисловості нові конструктивні моделі вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками (ВАЗЗП).

Таким чином, з великого різноманітність конструкцій пиловловлюючих пристроїв відцентрової дії, у тому числі і двохпоточних вихрових апаратів, можна виділити два основних конструктивних різновиди, які на даний час отримали розповсюдження в різних галузях вітчизняної промисловості: прямоточні вихрові пиловловлювачі із вторинним потоком газу та протитечні – апарати із зустрічними закрученими потоками (ВАЗЗП).

1.5.2 Апарати прямоточного типу

Дослідженням гідродинаміки, розробкою конструкцій і впровадженням прямоточних ВА займалися дослідники ВНПІЧЕО (рис. 1.1, в,г,д) [28–31, 46, 47].

Так, в роботах [29–31] повідомляється про випробування вихрових апаратів соплового типу. В [29] надані результати випробувань експериментальної моделі апарата діаметром $D_a = 200$ мм, ефективність якої на медичному тальку (параметри пилу : $d_{50} = 8$ мкм, $\sigma'_n = 2,9$) склала $\eta_0 = 98\%$ при загальному гідравлічному опорі апарата $p = 2500$ Па. В роботі [30] надаються результати промислових випробувань ВА прямоточного типу діаметром 0,200 та 0,500 м. Була досягнута ефективність пиловловлювання (параметри пилу : $d_{50} = 8$ мкм, $\sigma'_n = 2,9$) відповідно $\eta = 98\%$ і $\eta = 96\%$.

Про високоефективну роботу пиловловлювача із вторинним потоком газу під назвою «Вихор», змонтованого замість циклону діаметром $D_u = 3$ м, повідомляється в роботі [31]. До реконструкції остаточно запыленість повітря на виході сягала $Z_{\text{вих}} = 4$ г/м³ при початковій концентрації пилу $Z_{\text{вх}} = 50$ г/м³.

Чотири паралельно встановлених апарата «Вихор» з діаметром сепараційної камери $D_a=0,6$ м дозволили знизити забруднення викидів до рівня санітарних норм. При цьому загальна ефективність очищення аспіраційного повітря становила $\eta = 97\%$ при гідравлічному опорі $p = (1,3-1,8)10^3$ Па (без урахування енергетичних втрат в сопловому пристрої).

Замість типового циклона ЦН-15 діаметром $D_u=0,3$ м на виробництві гіпохлориту кальція, детергенту і отрутохімікату «Цинеб» був встановлений прямоточний пиловловлювач діаметром $D_a = 0,3$ м [47]. При витраті повітря через пиловловлювач $L_0 = 1600$ м³/г і запиленості вхідного потоку $Z_{вх} = 1$ г/м³ ВА показав загальну ефективність $\eta = 91\%$ (на пилу з параметрами : $d_{50} = 6-8$ мкм, $\rho_n = 500$ кг/м³) при втраті тиску $p = 1,4 \cdot 10^3$ Па.

Дослідження ефективності роботи ВА соплового типу проводились також і у провідному науково-дослідному інституті з очищення газів (НПОГАЗ, Москва) [48, 49]. Був випробуваний пиловловлювач моделі «Харріклон» з $D_a = 0,2$ м, який мав пропускну здатність $L_0=600$ м³/г, показав загальну ефективність на рівні $\eta = 85 \%$ на пилу з медіанним розміром $d_{50} = 11$ мкм. При випробуваннях відзначалася значна нестійкість роботи апарата навіть при фіксованому гідродинамічному режимі.

Прямоточні ВА рекомендовано використовувати у тих випадках, коли частка вторинного газу в загальній його витраті не перевищує 50 %. При цьому схильний до налипання пил слід подавати в апарат лише по основному каналу, а потік для закручування основного вихору подавати через сопла під надлишковим тиском. У порівнянні з циклонами такі ВА конструктивно дуже складні і згідно [29–31, 47–49] не мають будь-яких вагомих переваг за основними показниками роботи.

Найбільш відомим та достатньо дослідженим ВА прямоочної дії з вторинним потоком газу є «Вихор», схема якого показана на рис. 1.2, а принцип дії міститься у наступному.

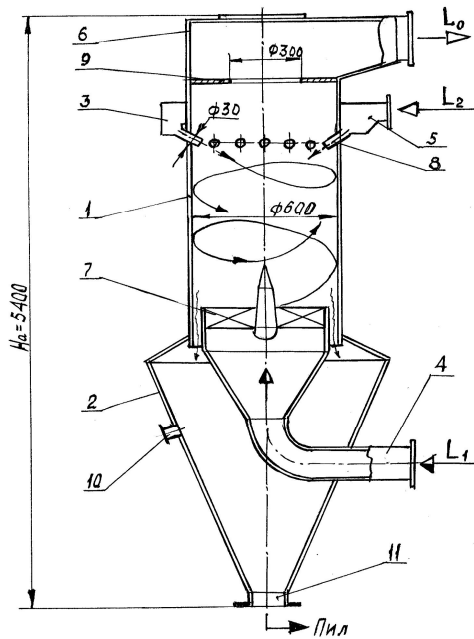


Рис. 1.2 – Апарат «Вихор» із вторинним потоком газу :

1–сепараційна камера;
 2–бункер; 3–колектор;
 4–канал первинного потоку;
 5–колектор подачі вторинного потоку; 6–розкручувач вихідного потоку; 7–закручувач типу «розетка»; 8–сопло;
 9–шайба відбійна; 10–штуцер відсмоктування повітря з бункера; 11–штуцер видалення пилу.

Первинний запилений потік (L_1) надходить під надлишковим тиском через патрубок 4, а вторинний (L_2) подається в сепараційну камеру 1 пиловловлювача по каналу 5 і колектор 3 через нахилені трубчасті сопла 8 діаметром 0,03м, встановлені під кутом до осі апарата. Первинний потік закручується за допомогою закручувача типу «розетка» 7 і рухається по осі знизу вгору інтенсивно обертаючись по висоті сепараційної камери діаметром $D_a = 0,600$ м. Рухаючись у напрямку відбійної шайби 9 первинний потік поступово втрачає інтенсивність свого обертання, але вгорі він попадає під дію вторинного потоку, що подається з колектора 5 через сопла 8, підкручується ним і крізь отвір діаметром 0,300 м відбійної шайби 9. Через уліточний розкручувач вихідного потоку 6 очищений потік (L_0) відводиться за межі апарата.

Частинки пилу, що містяться в ротаційному потоці, під дією відцентрових сил відкидаються в радіальному напрямку і досягають стінки сепараційної камери, при цьому вторинний потік не тільки відбиває дрібні частинки пилу у периферійному напрямку, але й транспортує уловлений пил у бункер 2, де він накопичується і через нижній штуцер 11 видаляється з апарата. Та надлишкова частка вторинного

поток, яка досягає рівня завихривача первинного потоку 7 і попадає в бункер 2, відсмоктується через штуцер 10 спеціальним пристроєм.

Конструкції ВА прямоточного типу із вторинним потоком газу (концепція німецьких вчених) досліджувались і в інших проектних установах та дослідницьких організаціях, але суттєвих результатів, які надавали б можливість організації та проведення галузевих порівняльних випробувань, дослідникам досягти не вдалося.

Організовані і проведені у відповідності з положеннями Єдиної методики [19] у провідному інституті з очищення газів (НПОГАЗ, Москва) галузеві порівняльні стендові випробування апарата «Вихор» з типовим циклоном ЦН–15 [29] дали можливість одержати репрезентативні дані щодо основних характеристик порівнювальних апаратів. Результати цих випробувань не підтвердили відомостей щодо високих значень ефективності сепарації та економічності пиловловачів із вторинним потоком газу. Так, максимальна ефективність вловлювання тестового кварцевого пилу ($d_{50} = 15$ мкм) склала у вихровому апараті $\eta = 66\%$ проти $\eta = (84–85)\%$ в типовому циклоні ЦН–15; питома енергоємність вихрового апарата більш ніж у 2,7 рази перевищувала цей показник циклона, а питома маса – в 1,6 рази. Значно програвав ВА типовому циклону і за габаритами.

Було зазначено, що ВА «Вихор», а також іншим моделям прямоточних пиловловачів [48, 49], притаманні певні недоліки, серед яких: наявність додаткового вентилятора високого тиску ; розбавлення очищеного газу повітрям навколишнього середовища; нестійкість гідродинаміки ; надто високі гідравлічні втрати, обумовлені насамперед подачею стислого повітря через сопла; відносно великі габарити та металоємність.

За результатами порівнювальних випробувань апарата із вторинним потоком газу «Вихор» провідним державним інститутом з очищення газів було визнано недоцільним використання його в якості пиловловача загального застосування, так як з основних режимно-конструктивних параметрів він поступається типовому циклону ЦН–15 [50].

Таким чином, аналіз літературних даних свідчить про те, що ВА із вторинним потоком газу на даний час не можуть розглядатися як перспективні конструкції природоохоронного обладнання, зокрема для використання їх в якості пиловловлювачів загальнопромислового призначення.

1.5.3 Апарати із зустрічними закрученими потоками

Другим конструктивним різновидом сухих відцентрових пиловловлювачів є зворотнопоточні вихрові апарати із зустрічними закрученими потоками (ВАЗЗП), які на відміну від вище розглянутих ВА прямоточного типу позбавлені багатьох недоліків.

Глибокі теоретичні та всебічні експериментальні дослідження моделей ВАЗЗПЦ почали проводити в Московському текстильному інституті (МТІ) починаючи з середини 70-х років минулого століття [13, 51–92]. Результатами цих досліджень є поширення області застосування ВАЗЗП з активною гідродинамікою в різних галузях промисловості в якості багатофункціональних технологічних пристроїв.

Глибокі теоретичні вишукування гідро- та аеродинаміки ВАЗЗП проводяться також і в Сумському національному аграрному університеті (СНАУ) [93–113] під керівництвом д. т. н., проф. Якуби О. Р. Дослідження проводяться по двох конструктивних різновидах вихрових апаратів : з циліндричною (ВВЗЗПЦ) та конічною сепараційною камерою (ВВЗЗПК).

Основні параметри закручених потоків. На відміну від прямоточного руху повітряного потоку, закручений відносно власної осі обертання потік характеризується трьома складовими швидкості – радіальною, осьовою та тангенціальною [114, 115]. Крім того, в закрученому потоці присутній градієнт тиску як в уздовжньому, так і в поперечному перерізі, причому тиск у біляосьовій зоні завжди нижче за тиск у пристінній зоні.

Найбільш відомий спосіб отримання закрученого потоку – подача повітря в закручувач, який на виході забезпечує рух одночасно в осьовому та тангенціальному напрямках. Ступінь закрутки потоку може змінюватись регулюванням співвідношення між витратами повітря, що рухається в осьовому і тангенціальному напрямках. Інший відомий спосіб закручування потоків – подача основного обсягу потоку, наприклад через гвинтоподібні чи нахилені лопатки завихрувача, а решти потоку – в обхід його. Такий спосіб створення закрученого потоку в техніці пиловловлювання використовується при організації слабо закручених течій. В сучасній техніці найбільше розповсюдження отримали закручувачі, що забезпечують утворення потоку від слабо- до сильно закрученого [116], причому, кожний тип характеризується основними параметрами : рівномірністю створюваного обертального потоку у поздовжньому перерізу, ступенем закручування, кутом розкриття в гирлі, перепускною здатністю, гідравлічним опором.

Кут розкриття струменя в повітряних закручених потоках є значно більшим, ніж у прямоточних потоках, що обумовлюється тим, що при закручуванні потоку і виході його у вільний простір різко зростає інтенсивність масообміну між обертальним потоком та повітрям навколишнього середовища. При цьому виникають відцентрові сили, що впливають на елементарні об'єми потоку і сприяють руху потоку у радіальному напрямку при вільному витіканні, що збільшує кут розкриття.

Найбільш розповсюдженою характеристикою інтенсивності обертання газового потоку [116] є так званий параметр закрутки :

$$\Theta = \frac{M}{K \cdot R}, \quad (1.1)$$

де M – момент кількості руху потоку, постійного уздовж його довжини ;

K – кількість руху потоку (осьовий імпульс потоку) ;

R – радіус устя циліндричного закручувача.

Значення величин M і K знаходяться інтегруванням з використанням осьових і тангенціальних швидкостей в будь-якому перерізі потоку, найчастіше у циліндричному усті, з рівнянь :

$$M = 2\pi\rho \int_0^R r^2 V_z V_\varphi dr, \quad (1.2)$$

$$K = 2\pi \int_0^R r(\rho \cdot V_z^2 + P) dr, \quad (1.3)$$

де V_z, V_φ – осьова і тангенціальна складова вектора швидкості потоку відповідно м/с ;

ρ – щільність середовища (повітря, газу), кг/м³ ;

r – поточне значення радіуса, м ;

P – статичний тиск в точці, де проводиться вимір швидкості, Па.

В якості параметра закрутки виступає відношення максимальних значень тангенціальної і осьової швидкості на виході з завихривача :

$$n_p = \frac{V_\varphi^m}{V_z^m}. \quad (1.4)$$

Якщо потік з постійним розподілом осьової швидкості в площині отвору за характером течії відповідає обертанню твердого тіла, тобто цілком являє собою ротаційний потік, тоді можна записати :

$$V_\varphi = V_\varphi^m \left(\frac{r}{R} \right) \quad \text{і} \quad V_z = V_z^m. \quad (1.5)$$

Складові формули (1.1) можуть бути представлені у вигляді :

$$M = 2\pi\rho \int_0^R r^2 V_z V_\varphi dr = \frac{1}{2} \pi\rho \cdot V_z^m \cdot V_\varphi^m \cdot R^3, \quad (1.6)$$

$$K = 2\pi \int_0^R r(V_z^2 - \frac{1}{2} V_\varphi^2) dr = \pi\rho (V_z^2)^2 \cdot R^2 \left(1 - \frac{1}{4} n_p^2 \right), \quad (1.7)$$

$$\Theta = \frac{M}{K \cdot R} = \frac{0.5 n_p}{1 - 0.25 n_p^2}. \quad (1.8)$$

Величини Θ і n_p до значень $n_p=0,4$ адекватні, тобто безпосередньо співпадають за своїми значеннями. Для випадків, коли $n_p>0,4$, кореляційний зв'язок між Θ і n_p описується наступним рівнянням :

$$\Theta = \frac{0,5 \cdot n_p}{1 - 0,5 \cdot n_p}, \quad (1.9)$$

а для $n_p<0,4$

$$\Theta = n_p \cdot \frac{V_\varphi^m}{V_z^m}. \quad (1.10)$$

Параметри закрутки для найбільш розповсюджених конструкцій механічних завихрувачів відомі [116].

Математичні моделі вихрових апаратів. Дослідники вихрової апаратури з різних країн при вивченні гідродинаміки розроблювали свої математичні моделі, які в тій чи іншій мірі відображали дійсну картину.

Перші математичні моделі Шмідта, Кляйна [34] та Подгорського [117] були несистематизованими математичними ілюстраціями до фізичних пояснень авторів щодо природи явищ, які вивчаються. Але ці моделі не дозволяють розрахувати вихровий апарат для конкретних умов експлуатації. В інших роботах були розглянуті рівняння руху частинки у вихровому пиловловлювачі із вторинним потоком газу, які дозволяли при відомому полі швидкостей за допомогою складних аналітичних виразів розраховувати траєкторію руху частинки конкретного розміру, а також фракційну ефективність їх сепарації. В цих моделях авторам не вдалося отримати задовільної відповідності теоретичних досліджень експериментальним даним через те, що деякі чинники не могли бути врахованими, такі як коагуляція частинок, турбулентна дифузія, рух частинок в обмежених умовах безпосередньо біля стінки.

У подальшому дослідниками робилися спроби вирішити задачу в загальному вигляді, при цьому частково враховувався і енергетичний баланс

зустрічних потоків, що призводило до зміни їх рівня закрученості по висоті сепараційної камери апарата. В результаті була досягнута більш-менш задовільна збіжність розрахункових даних з експериментальними.

Розглядався також аналітичний розподіл швидкостей та силових навантажень в апараті і математичний доказ явища концентрації тонкодисперсних частинок, що спостерігалось на межі розподілу первинного та вторинного закручених потоків. Тенденція переміщення частинок як із зовнішнього, так і з внутрішнього обертових потоків, до межі їх розділу обґрунтовується авторами дією ефекту Магнуса. За висновками дослідників, у вихровому (внутрішньому) потоці переважає відцентрова сила, направлена, як і сила Магнуса, у напрямку від осі до межі розділу потоків, а у потенційному (зовнішньому) – сила Магнуса діє у протилежному відцентровій силі напрямку, причому її вплив превалює, що власне й викликає концентрацію твердих частинок на межі розділу двох зустрічних закручених потоків.

Американські дослідники Сіліберті Д. Ф. і Ланкастер Б. У. [119] присвятили двохпоточним вихровим апаратам із вторинним потоком ряд важливих з наукової точки зору робіт. В них автори повідомляють про дослідження поля швидкостей газової фази у вихровому апараті із вторинним потоком. Експериментально отриманий профіль тангенціальної і осьової швидкостей був використаний для розрахунку траєкторій частинок різного розміру. Радіальна складова швидкості визначалась виходячи з рівняння нерозривності потоку введенням так званої функції струму. Розрахунок величини фракційної ефективності уловлювання показав надмірно велику розбіжність з експериментальними даними, особливо для дрібнодисперсних (1–4 мкм) частинок. Далі була прийнята спрощена модель перебігу потоків в сепараційній камері ВА. При цьому були прийняті припущення, що, по-перше, у будь-якій точці на осі ядра течії в апараті потік вважається вихровим, а, по-друге, що потенційний потік рівномірно підсмоктується до вихрового по всій висоті сепараційної камери. Введення цих допущень дало

можливість отримати для вихрових пиловловлювачів теоретичну залежність, яка дозволила визначати мінімальний розмір уловлюваної частинки пилу та загальну ефективність пиловловлювання. Але теоретичні дані погано узгоджувались з експериментальними.

В роботі Векуа Т. Ю. [69] для моделі ВАЗЗПЦ отримані рівняння, по яких розраховують параметри d_0 і d_η :

$$d_0 = \frac{4,15R_0^2}{L_1 + \frac{L_2}{2}} \sqrt{\frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{L_2}{H}}, \quad (1.11)$$

$$d_\eta = \frac{4,15R_0^2}{L_1 + \frac{L_2}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{L_2 \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)}{H \cdot \ln\left(1 + \left(\frac{L_1}{L_2}\right)\right)}}. \quad (1.12)$$

Відомостей щодо геометрії моделі ВАЗЗПЦ та адекватності математичної моделі не знайдено.

Численні наукові роботи дослідників, пов'язані з математичним моделюванням гідродинаміки апаратів із зустрічними закрученими потоками, призначеними як власне для процесу пиловловлювання відцентровими пиловловлювачами [53, 54, 57–65, 69, 82, 107, 112], так і для інших технологічних процесів [52, 66, 68, 75, 81, 88], мають аналогічний розглянутому вище підхід: спроба в кінцевих розрахункових формулах з визначення шуканих величин враховувати певні режимно-конструктивні параметри апарата та деякі зовнішні умови. Але зробити такі розрахункові формули цілком універсальними, які були б простими і розповсюджувалися не тільки на конкретну модель вихрового апарата не вдалося нікому. Тому й до теперішнього часу проектувальники знепилюючих систем, створених на базі моделі ВАЗЗПЦ, не мають прийнятної методики інженерного розрахунку.

Інноваційний підхід в математичному моделюванні процесу сепарації частинок пилу в системі закручених потоків мають наукові роботи д.т.н. проф. Якуби О. Р. з Сумського національного аграрного університету (СНАУ) [105, 107, 108, 110–113, 118], які більш ґрунтовно розглядаються в пп. 3.2, 3.3.

Аеродинаміка вихрових пиловловлювачів. З чисельних описів фізичної картини системи закручених потоків слід виділити роботи К. Шмідта та В. Подгурського [117].

Фізична модель процесів по Шмідту заснована на принципі утворення двох вихрових течій, відомих в природі під ім'ям “ТАЙФУН”. Комбінація течій складається з ротаційного потоку, що обертається в осьовій зоні, та потенційного безвихрового потоку, що оточує ротаційний. Напрямок функціонуючого поблизу стінки сепараційної камери потенційного потоку в його зовнішній частині протилежний напрямку течії ротаційного потоку, а у внутрішній частині він співпадає з напрямком останнього. В результаті взаємодії обох потоків утворюється результуюче поле течій, в якому діє досить складна система сил, однак дві з них є визначними: відцентрова сила, направлена від центра до периферії та сила лобового опору, направлена назустріч. Ці сили власне і обумовлюють виділення твердої фази із запыленого потоку.

В якості базової конструктивної схеми науковцями з Московського текстильного інституту спочатку був обраний прямоточний апарат із вторинним потоком газу, але попередні лабораторні випробування виявили цілий ланцюг суттєвих недоліків, які протягом досить тривалого часу досліджень поступово усувалися. При цьому після аналізу одержаних результатів дослідники зупинилися на двох на їх погляд перспективних моделях, схематично показаних на рис. 1.3, 1.4.

Перша модель – конструкція вихрового апарата із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою (ВАЗЗПЦ) – досліджувалася і розроблювалася в МТІ [34, 72].

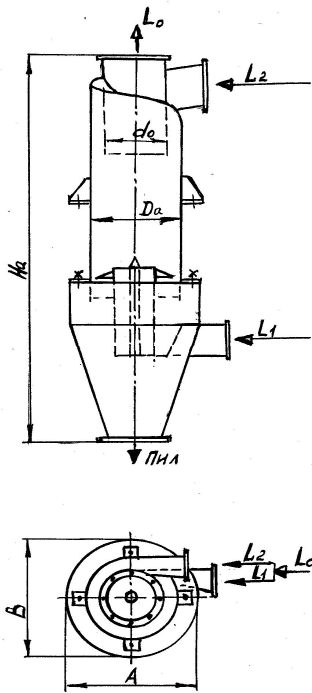


Рис. 1.3 – Модель
ВА33ПЦ

Ця модель ВА, що умовно віднесена до високопродуктивних, успішно пройшла міжвідомчі порівняльні випробування у відповідності з Єдиною методикою [19] і була рекомендована для використання в різних галузях промисловості в якості відцентрового сухого пиловловлювача загального застосування [18]. В цьому апараті первинний потік (L_1) подається знизу через осьовий циліндричний завихрувач і рухається вгору, а вторинний потік (L_2) подається через тангенціальний завихрувач зверху і рухається уздовж стінки сепараційної камери вниз назустріч первинному. Очищений потік (L_0) відводиться з апарата через осьовий циліндричний вихідний патрубок. Сепарація частинок здійснюється під дією системи сил, переважно відцентрових, в циліндричній сепараційній камері, а уловлений пил під дією пристінної частки вторинного потоку транспортується до рівня відбійної шайби і збирається в бункері, звідки через нижній штуцер покидає апарат.

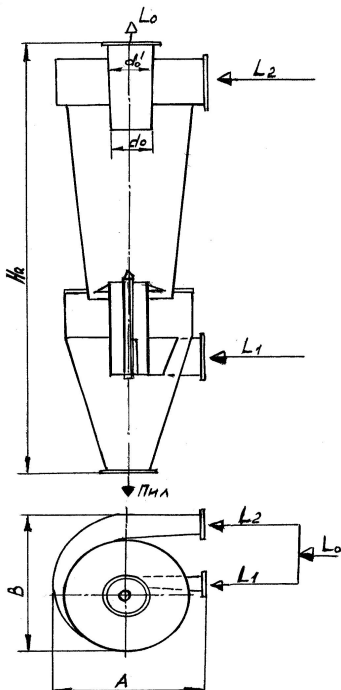


Рис. 1.4 – Схема моделі ВА33ПК
(з конічною сепараційною камерою)

На відміну від моделі ВА33ПЦ [15–16], пиловловлювач ВА33ПК [113] відноситься до високоефективної моделі (рис. 1.4).

Сепараційна камера, вихідний патрубок та завихрувач первинного потоку виконуються конічними, а завихрувач вторинного потоку –

уліточного типу. Співвідношення геометричних розмірів елементів ВАЗЗПК значно відрізняються від моделі ВАЗЗПЦ.

Підвищена ефективність пиловловлювання моделі ВАЗЗПК порівняно з моделлю ВАЗЗПЦ обумовлена менш «швидкісним» гідродинамічним режимом в сепараційній камері. Принцип дії цих моделей є однаковим.

Слід зазначити, що модель ВАЗЗПК на даний час не має сталих і затверджених співвідношень геометричних розмірів, не піддавалася порівняльним стендовим випробуванням згідно [19], тому в дисертаційній роботі вона не розглядається.

Одиночні вихрові апарати. Одиночні ВА використовуються в аспіраційних системах як окремо встановлювані пристрої, при цьому кількість елементів визначається лише продуктивністю з очищуваного повітря. ВА великого діаметру мають, як правило, індивідуальний вентилятор, але можуть бути й системи, в яких об'єднуються декілька елементів однакового чи різного типорозміру, працюючих від одного потужного вентиляторного агрегата.

На рис. 1.5 показана схема пиловловлювача моделі ВАЗЗПЦ [34].

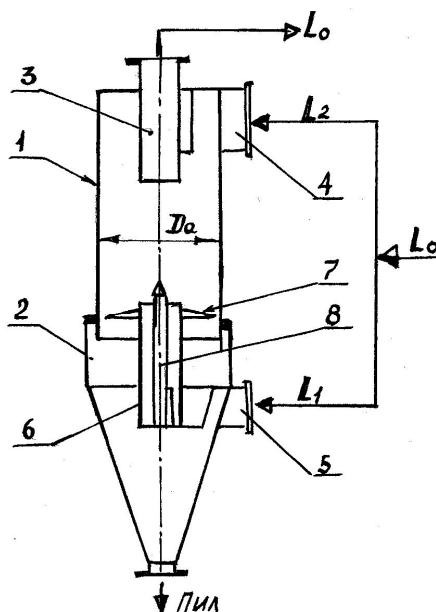


Рис. 1.5 – Конструктивна схема ВАЗЗПЦ :

- 1 – циліндрична сепараційна камера ;
- 2 – циліндроконічний пилозбірний бункер ;
- 3 – вихідний патрубок ; 4 – канал подачі вторинного потоку ; 5 – канал подачі первинного потоку ; 6 – завихритель первинного потоку ; 7 – шайба відбійна ;
- 8 – осьовий витискувач.

До складу моделі ВАЗЗПЦ входять такі функціональні елементи, які у сукупності забезпечують потрібний гідродинамічний режим в сепараційній камері.

Важливим функціональним вузлом сучасних знепилюючих установок з об'ємним накопиченням і вивантаженням уловленого пилу є бункерна частина, яка є невід'ємною частиною і певним чином може впливати на загальну ефективність пиловловлювання відцентрових пиловловлювачів.

Вибір типу і розмірів пиловивантажувального обладнання, виходячи з великої кількості пиловидних матеріалів з широким діапазоном дисперсності, фізико-хімічних, адгезійно-когезійних властивостей, абразивності, вологості і температури, є досить складною задачею. До того ж часто цей вибір може бути регламентований вимогами споживача щодо переведення пилу у непилющу форму, наприклад у вигляді гранул [136].

Помилки і неточності розробників при проектуванні систем пиловивантаження з бункерів-накопичувачів є причиною забивання пилом бункерів і затворів, підсмоктування повітря у бункер, завищення габаритів, металоємності обладнання і зниження ефективності уловлювання пилу.

Практика свідчить, що проблемні питання стосовно пиловидалення повинні розв'язуватися комплексно, у чіткому взаємозв'язку роботи бункерів-накопичувачів і вивантажувальних механізмів, а розробку системи вивантаження пилу необхідно вести одночасно у двох напрямках :

- розробка і використання засобів попередження і усунення зависання пилу в бункерах-накопичувачах;
- розробка і правильний вибір ефективних і надійно працюючих транспортуючих і затворних пристроїв стосовно різних умов вивантаження та подальшого транспортування матеріалу з бункерів пиловловлюючих апаратів.

Евакуація уловленого пилу з бункерів здійснюється через тічки з допомогою пилових затворів, основною функцією яких є вчасне видалення пилу без підсмоктування зовнішнього повітря.

Підсмоктування повітря ззовні в значній мірі збільшують винос пилу з очисних апаратів, підвищують навантаження на тягові вентилятори, викликають корозію стінок бункерів, погіршують витікання пилу з бункерів,

знижують продуктивність затворів, призводять до припинення вивантаження пилу з бункерів.

Слід зазначити, що переважна більшість аспіраційних систем, створюваних на базі відцентрових пиловловлювачів, працює під розрідженням від 0,25 до 10 кПа. Це вимагає забезпечення надійної герметизації і відповідних ущільнень між пиловловлювачем, бункером та механізмом вивантаження пилу. Крім того, бункер-накопичувач в системах, створюваних на базі моделі ВАЗЗПЦ, має забезпечувати не тільки надійне вивантаження пилу, але й попередження перетікання повітря між суміжними елементами в групових та батарейних установках.

На відміну від циклонних бункерів-накопичувачів пилу [11, 136], в яких має місце продовження аеродинамічних процесів, що протікають в сепараційній зоні, і які певним чином впливають на ефективність сепарації частинок пилу, у приймальниках пилу моделі ВАЗЗПЦ осадження і накопичення уловленого матеріалу проходить без будь-яких особливих утруднень. Але в окремих випадках можуть мати місце й певні проблеми, що розглядаються нижче.

Вибір ефективно і надійно працюючих затворів визначається конструкцією бункерів (насамперед розміром пиловипускного отвору), кількістю матеріалу, що вивантажується, його основними характеристиками і специфічними властивостями, а також параметрами зовнішніх умов – температурою та вологістю навколишнього середовища.

Крім того, конструкція і розміри пиловивантажувального механізму залежать від періодичності вивантаження. При розробці схеми пиловидалення необхідно також передбачати можливість здійснення поточного обслуговування і ремонту, а також заміни механізмів з вивантаження пилу, без зупинки системи аспірації.

Найбільш розповсюджені в техніці знепилювання запорошених потоків конструктивні типи пристроїв для вивантаження пилу розглянуті в [136].

Слід зазначити, що правилами експлуатації аспіраційних установок передбачається вивантаження пилю без надлишкового його накопичення в бункері. Тому продуктивність пилового затвора має надійно забезпечувати відведення всієї кількості пилю, що знаходиться в бункері. З іншого боку, щоб попередити вірогідність підсмоктування повітря через можливі нещільності нижче фланцевого сполучення випускного патрубку, в нижньому штуцері якого має бути присутньою певна кількість пилю, яка виконувала б функцію затвора. Але забезпечити такий режим роботи можливо лише за умовою безперервного контролю рівня пилю в бункері та керування роботою механізму вивантаження пилю.

Слід зауважити, що на практиці часто виникають певні утруднення при спорожненні бункерів для збирання пилю, причиною яких є погіршення процесу вивантаження пилю внаслідок його певних характеристик.

Так, наприклад, здатність частинок пилю до злипання (когезія), викликає підвищення міцності пилової маси, що впливає на її спроможність протистояти руйнуванню. Внутрішнє тертя перешкоджає пластичному деформуванню, тобто перебігу пилової маси. На текучість пилю впливає також і час перебування пилю в бункері.

Комплекс властивостей матеріалу частинок пилю має бути врахований при конструюванні бункерів, при цьому визначаються найбільш впливові показники, що погіршують надійність вивантажування.

Видалення пилю з бункерів забезпечується різними засобами в залежності від властивостей матеріалу, тому на практиці при вирішенні цього питання здійснюють вибір оптимальної геометрії бункера, активні чи пасивні засоби усунування можливих перешкод, зміна властивостей матеріалу і режиму роботи бункера [136]. На рис. 1.6 показана бункерна частина типової моделі ВА3ЗПЦ.

Бункер-накопичувач пилю 3 складається з циліндричної частини висотою h_y і конічної частини висотою h_k з кутом розкриття конуса α , в

нижній частині якої передбачений отвір діаметром d_0 . Всередині нерухомо встановлений завихрювач первинного потоку, а зверху – сепараційна камера 1, яка поєднується з бункером за допомогою болтового з'єднання.

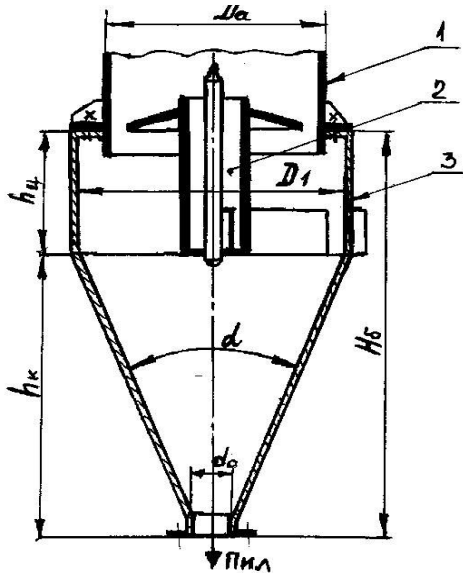


Рис. 1.6 – Схема бункерної частини пиловловлювача

ВАЗЗПЦ :

- 1 – сепараційна камера ;
- 2 – завихрувач первинного потоку ;
- 3 – бункер-накопичувач пилу.

- через первинний канал надходить чисте повітря, а по вторинному – запырошене ;
- запырошений потік надходить лише по вторинному каналу, а по первинному – певна частка вже очищеного в апараті повітря ;
- запырошений потік одночасно подається по обох каналах.

Вибір схеми включення визначається виключно економічними та експлуатаційними вимогами.

Групові вихрові апарати. Як відомо, зі збільшенням діаметра сепараційної камери моделі ВАЗЗПЦ зменшується як загальна, так і

Така конструкція бункера-накопичувача пилу обгрунтовується наступним.

В бункерній частині апарата моделі ВАЗЗПЦ здійснюється повне осадження уловленого пилу, який проникає в її середину через кільцевий зазор, утворений на рівні відбійної шайби. Кут розкриття конічної частини бункера α визначається кутом природного укосу уловлюваного пилу. Діаметр отвору в нижній частині бункера вибирається виходячи з умови вільного руху пилу до механізму вивантаження, і залежить від сводоутворюючого розміру [136].

Одиночні вихрові пиловловлювачі можуть бути включені в систему повітропроводів по схемах, коли :

фракційна ефективність пиловловлювання, тому в техніці пиловловлювання вдаються до групування одиночних апаратів у групові та батарейні [2, 6, 8].

Для очищення значної кількості запилених газів, вдаються до установки ряду паралельно встановлених апаратів з відповідною схемою складання. На рис. 1.7 і 1.8 показані можливі схеми групової компоновки ВАЗЗПЦ.

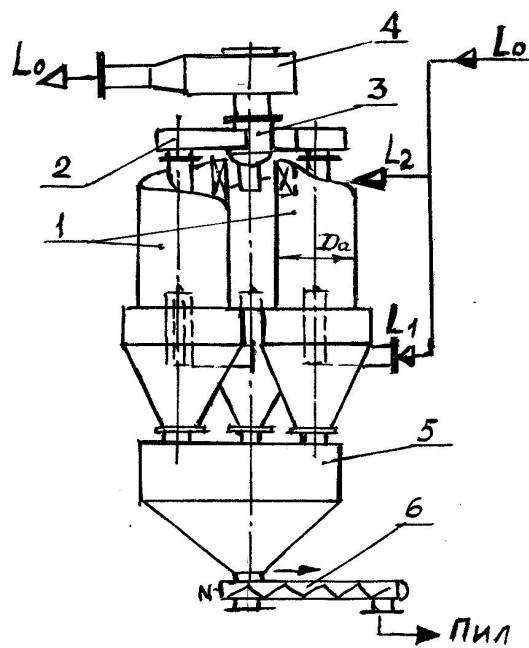


Рис. 1.7 – Схема групової компоновки (варіант від 2 до 8 елементів ВАЗЗПЦ) :

- 1 – одиночний елемент ВАЗЗПЦ ;
- 2 – розкручувач потоку «улітка» ;
- 3 – блок розкручувачів ;
- 4 – вихідний колектор ;
- 5 – бункер-накопичувач пилю ;
- 6 – механізм видалення пилю.

Одиночні елементи ВАЗЗПЦ 1 монтуються на один загальний бункер-накопичувач пилю 5. Вгорі кожний з елементів має власний розкручувач вихідного потоку 2, поєднаний з блоком розкручувачів 3, що сполучається з вихідним колектором 4, через який очищене повітря видаляється за межі установки. Уловлений пил, що накопичується в бункері 5 з кожного з одиночних елементів 1, безперервно видаляється з нього за допомогою механізму 6.

Виходячи з потреби мінімізації габаритних розмірів, розміщення одиночних елементів ВАЗЗПЦ в плані може бути квадратним, прямокутним та круговим.

Компоновочне рішення установки у груповому виконанні може відповідати за схемою, показаною на рис. 1.8, згідно якій загальна пиловловлююча система складається з двох ступеней очищення.

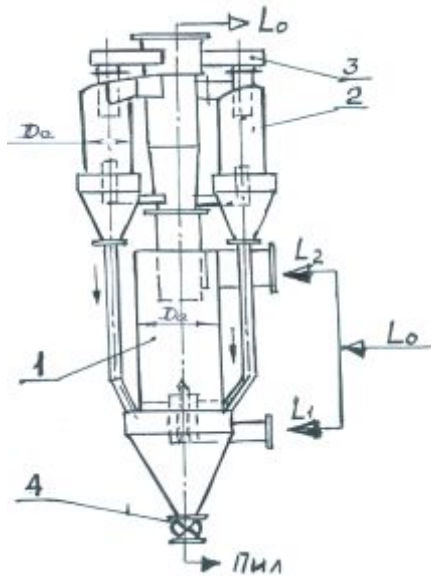


Рис. 1.8 – Групова компоновка
ВАЗЗПЦ

(елементи різного діаметра) :

- 1 – апарат ВАЗЗПЦ (перша ступінь очищення) ;
- 2 – апарат ВАВЗПЦ (друга ступінь очищення) ;
- 3 – блок розкручування потоків ;
- 4 – механізм видалення пилу.

Перша ступінь уловлювання здійснюється в одиночному елементі ВАЗЗПЦ 1 збільшеного діаметру. Зверху безпосередньо до вихідного патрубку приєднується складена друга ступінь очищення 2, що містить декілька елементів меншого діаметра, кількість яких визначається виходячи із загальної продуктивності з повітря, що очищується, потрібного рівня ефективності пиловловлювання та просторових умов місця установки системи.

Багатоваріантність компоновочних рішень залежить насамперед від конкретних вимог та специфічних умов того виробничого процесу, для якого розробляється аспіраційна установка.

Батарейні вихрові мультіапарати. Зменшення діаметра сепараційної камери моделі ВАЗЗПЦ супроводжується підвищенням загальної ефективності пиловловлювання, тому часто вдаються до групування великої кількості мультіелементів моделі ВАЗЗПЦ. На відміну від групової компоновки, створення батарейної установки на базі одиночних елементів має певну специфіку.

На рис. 1.9 в якості одного з можливих варіантів показана схема батарейної установки, складеної з мультіелементів моделі ВАЗЗПЦ-40 (діаметром елемента 0,04 м).

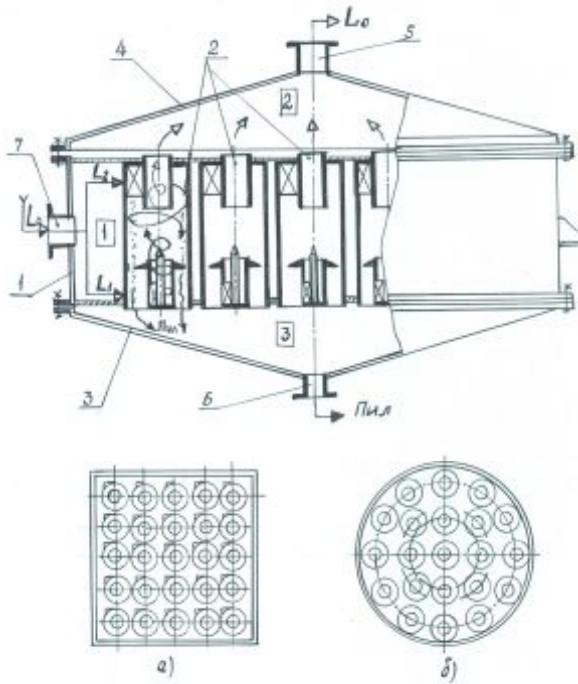


Рис. 1.9 – Схема батарейної установки ВАЗЗПЦ :

- 1 – корпус ; 2 – мультіелементи ;
- 3 – днище ; 4 – кришка ;
- 5 – патрубок очищеного повітря ;
- 6 – патрубок видалення пилу ;
- 7 – патрубок подачі аерозолю.

В корпусі 1 в плані прямокутної (рис. 1.9, а), круглої (рис. 1.9, б) чи будь-якої іншої форми рівномірно розміщені мультіелементи 2. По висоті корпусу 1 робочий об'єм поділений на три відокремлені зони : 1 – розподілу потоків по вхідних каналах мультіелементів – первинних (L_1) і вторинних (L_2) 4 ; 2 – порожнина над вихідними патрубками, в якій збирається очищене повітря з усіх мультіелементів; 3 – порожнина нижче зони розподілення потоків, де накопичується уловлений пил.

Варіант компоновки з розміщення мультіелементів в плані вибирається в залежності від їх загальної кількості, діаметра сепараційної камери, обмеженості з габаритних розмірів.

Робота такої аспіраційної установки міститься у наступному.

Запилений потік через боковий патрубок 7 в корпусі 1 надходить у порожнину першої зони, розподіляється між окремими мультіелементами, де очищується від пилу з відповідною ефективністю, а очищений від пилу потік збирається у другій зоні і відводиться через верхній патрубок 5 на кришці 4. Пил з третьої зони неперервно видаляється через нижній штуцер 6. Креслення мультіелемента ВАЗЗПЦ–40 показано на рис. 1.10.

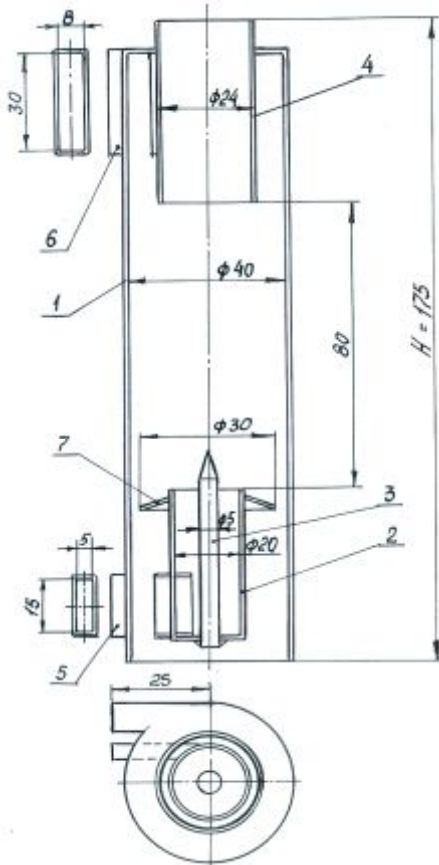


Рис. 1.10 – Мультиелемент ВА33ПЦ–40 :

1 – сепараційна камера ; 2 – завихритель первинного потоку ; 3 – витиснювач ; 4 – вихідний патрубок ; 5 – патрубок подачі первинного потоку ; 6 – патрубок подачі вторинного потоку ; 7 – шайба відбійна.

Мультиапарат ВА33ПЦ–40 являє собою цілком зварну конструкцію, яка складена з циліндричної сепараційної камери 1 внутрішнім діаметром 40 мм із шліфованою внутрішньою поверхнею, завихрителя первинного потоку 2 з відбійною шайбою 7, витиснювача 3, вихідного патрубка 4, прямокутного перерізу вхідних каналів відповідно первинного 5 та вторинного 6 потоків.

Слід зазначити, що точність виготовлення проточної частини кожного з мультиелементів повинна бути досить високою, щоб у будь-яких експлуатаційних умовах надійно забезпечувати робочі параметри і стійкість гідродинамічного режиму та ефективність пиловловлювання.

При будь-якому варіанті компоновки пиловловлюючої системи рекомендується дотримуватись наступних рекомендацій :

- забезпечувати надійну герметизацію окремих зон як всередині, так і зовнішніх з'єднань ;
- попереджати закупорювання пилом вхідних каналів мультиелементів, що досягається вибором рекомендованих швидкостей потоків ;
- дотримуватись номінальної точності виготовлення мультиелементів та збірки системи в цілому ;
- уникати розміщення різних типорозмірів мультиелементів ВА33ПЦ у одному й тому ж блоці батарейного пиловловлювача.

1.5.4 Порівняльний аналіз вихрових апаратів

Порівнянню піддані два різновиди вихрових пиловловлювачів – моделей ВАЗЗПЦ та ВАЗЗПК, які на даний час мають більш-менш відомі режимно–конструктивні параметри та технічні показники [14, 22, 23].

Порівнювані параметри пиловловлювачів (табл. 1.1) наведені виходячи з рівної пропускної здатності (Q) з очищуваного потоку в межах середніх (умовних) планових швидкостей, що відповідають мінімальній (Q_{\min}) та максимальній (Q_{\max}) витраті повітря. Загальна ефективність пиловловлювання (η) і гідравлічні втрати (ΔP), а також коефіцієнт гідравлічного опору (ξ) визначалися при гранично допустимих концентраціях пилу для даного типорозміру. Наведені також габаритні розміри одиночних ВА : загальна висота (H), ширина та довжина ($A \times B$) в плані.

Таблиця 1.1 - **Технічні характеристики вихрових пиловловлювачів**

Діаметр сепараційної камери, $D_{\text{ар}}$, мм	$Q_{(\text{н.у.})}$				Коеф. ідравлічн. опору, ξ	Запиленість повітря, Z_{max} , $\text{г}/\text{м}^3$	Ефективність уловлювання, η , %	Габаритні розміри		Маса*, кг
	Q_{\min} , $\text{м}^3/\text{год}$	ΔP_{\min} , Па	Q_{\max} , $\text{м}^3/\text{г}$	ΔP_{\max} , Па				Висота, H , мм	Ширина, довжина, ($A \times B$), мм	
100	141	514	254	1666	34	600	99,8	592	125x145	7,5
150	318	529	572	1715	35	700	99,5	890	190x220	18
200	565	605	1017	1960	40	800	99,0	1184	250x290	38
300	1272	666	2289	2156	44	1000	98,5	1665	535x525	69
450	2861	741	5150	2401	49	1500	98,0	2487	900x850	169
600	5087	756	9156	2450	50	2000	97,5	3330	1100x1050	492
800	9043	756	16278	2450	50	2500	96,0	4008	1500x1500	551
1100	17097	832	30775	2695	55	3000	95,0	6350	1803x1930	760
1200	20347	832	36625	2695	55	3000	95,0	6862	2000x1950	800
1600	36173	832	65111	2695	55	3500	94,0	9480	2400x2580	2814
2000	56520	832	101736	2695	55	3800	93,0	12000	2790x2980	-

Модель ВАЗЗПК– з конічною сепараційною камерою

Діаметр сепараційної камери, D_a , мм	$Q_{(н.у.)}$				Коеф. гідравлічн. опору, ξ	Запиленість повітря, Z_{max} , $г/м^3$	Ефективність уловлювання, η , %	Габаритні розміри		Маса*, кг
	Q_{min} , $м^3/год$	ΔP_{min} , Па	Q_{max} , $м^3/г$	ΔP_{max} , Па				Висота, H , мм	Ширина, довжина ($A \times B$), мм	
100	141	1664	254	5391	110	600	99,9	585	170x180	8,5
150	318	1739	572	5636	115	700	99,8	850	300x280	18
200	565	1815	1017	5881	120	800	99,7	1170	380x340	27
300	1272	1966	2289	6371	130	1000	99,6	1710	535x490	120
450	2861	2269	5150	7351	150	1500	99,5	2560	800x740	131
600	5087	2723	9156	8821	180	2000	98,0	3380	1070x980	-
800	9043	3025	16278	9801	200	2500	98,0	4505	1420x1310	-
1100	17097	3781	30775	12251	250	3000	97,0	6435	2090x1870	-
1200	20347	3781	36625	12251	250	3000	96,0	7020	2280x2040	-
1600	36173	3781	65111	12251	250	3500	95,0	9360	3040x2720	-
2000	56520	3781	101736	12251	250	3800	94,0	11700	3800x3400	-

* Маса наведена для корпусів апаратів з товщиною стінки 3 мм.

Як видно з порівнюваних даних, коефіцієнт гідравлічного опору (ξ) моделі ВАЗЗПЦ знаходиться в межах (34–55), тоді як для ВАЗЗПК – (110–250), що в 3,2–4,5 рази вище для останнього. Це означає, що загальні енергетичні витрати на очищення запиленого потоку в конічних сепараційних камерах значно перевищують цей показник для апаратів з циліндричною сепараційною камерою. Загальна ефективність (η) очищення заповненого повітря у порівнюваних моделях на (1–2) % для великих, та на (0,3–07) % для малих типорозмірів вище на користь апарата з конічною сепараційною камерою.

Що стосується габаритних розмірів порівнюваних пиловловлювачів, то вони практично однакові, як і металоемність.

В таблиці 1.2 наведені порівняльні характеристики моделі ВАЗЗПЦ з іншим типовим пиловловлюючим обладнанням.

Таблиця 1.2 - Порівняльна характеристика витрат на пиловловлююче обладнання (для $Q = 100$ тис. $m^3/год$)

Обладнання	η , % (станд. пил)	Капітальні вкладення, у.о		$\Delta P_{сер}$, Па	Експлуатаційні витрати, у.о./рік		
		загальні	на 1 $m^3/год$		електро-енергія	вода	ремонт
Інерційні пиловловлювачі	58,6	26 200	0,262	420	1 850	-	240
Циклони ЦН-15	84,2	36 800	0,368	1230	5 420	-	144
Рукавні фільтри	99,7	125 000	1,250	625	4 490	-	7700
Мокрі циклони	91,0	45 000	0,450	98	4 870	336	770
Скрубери Вентурі	99,7	82 000	0,820	500	22 600	2 900	770
Електрофільтри	99,9	170 000	1,700	230	2 400	-	960
Апарати ВАЗЗПЦ	96,0	30 000	0,300	1500	4 500	-	112

З таблиці витікає, що модель ВАЗЗПЦ за рівнем загальної ефективності пиловловлювання та питомих енерговитрат наближується до рукавних фільтрів, мокрих циклонів та скруберів Вентурі при мінімальних витратах на ремонт та технічне обслуговування.

1.5.5 Розробка пиловловлювачів та аспіраційних систем

Кожна з галузей промисловості, що потребує використання обладнання для очищення запылених потоків, має свої специфічні особливості, тому при розробці і впровадженні пиловловлюючих систем, створених на базі моделі ВАЗЗПЦ, доцільно максимальною мірою їх враховувати.

Широкий спектр виробництв і матеріалів, що переробляються, потребує індивідуального підходу до кожного джерела утворення пилу.

В різних галузях промисловості найбільш розповсюдженим шляхом вирішення екологічних проблем з очищення запылених потоків є технічна реконструкція існуючих установок. Як правило, підставою для цього є те, що технічні характеристики діючих пиловловлюючих установок з часом

становляться такими, що не відповідають збільшеним вимогам щодо чинних санітарних норм викидів. Тому Замовник змушений приводити відповідні параметри таких установок до нових вимог. У цьому випадку Виконавцем проводиться попередній розрахунок показників роботи з використанням моделі ВАЗЗПЦ з максимально можливим використанням базових комунікацій та вентиляторних установок.

Хімічна промисловість. Хімічні виробництва відрізняються широким спектром як джерел утворення пилу, його характеристик і властивостей, так і вимог щодо ефективності знепилювання запыршених потоків, тому концепції аспіраційних систем можуть бути різноманітними.

На малотонажних, але з великою кількістю номенклатури напівпродуктів і барвників, виробництвах анілінобарвної промисловості, аспіраційні системи характеризуються досить вузьким функціональним призначенням, відносно малими габаритами, високою пропускнуою здатністю та середнім рівнем енергоспоживання. Тому і конструктивне оформлення елементної бази знепилюючих установок може перебувати в досить широкому діапазоні типорозмірів при двох- і багатоступеневій, батарейній чи комбінованій компоновці.

У фосфорній промисловості для сушіння кварциту, коксу та фосфориту використовують сушильні барабани, схема очищення димових від яких складена, як правило, з двох паралельних систем. У такій системі очищення можлива заміна циклонів на більш ефективні ВАЗЗПЦ.

Технологічний процес виробництва СМС є складним і містить такі пилоутворюючі стадії як транспортування і підготовка сировини, приготування складних сипких композицій, сушіння, фасування порошку.

У вітчизняній хімічній промисловості застосовуються схеми очищення газів з розпилювальних сушарок, складених з прямоточного відцентрового передуволлювача та другого ступеня з сухих циклонів і мокрих скрубєрів.

В подібних схемах, шляхом заміни циклонів, а в деяких випадках і мокрих скрубєрів, на ВАЗЗПЦ, можна досягти значного підвищення ефективності очищення аерозолів.

Для уловлювання технічного вуглецю традиційно застосовуються складні двох- і трьохступінчасті системи на базі циклонів, циклонно-пінних апаратів, мокрих скрубєрів, електрофільтрів, тканиних рукавних фільтрів, а також пінних апаратів на ступені санітарного очищення.

У вказаних системах застосування установок ВАЗЗПЦ для попереднього очищення забруднених потоків сприятиме вирішенню багатьох проблем з захисту навколишнього середовища і економічних питань.

При виробництві будівельних матеріалів, зокрема, на таких об'єктах як бетонні заводи, підприємства з виробництва цегли, цементу, керамзиту, віконного і спеціального скла, комплекси з деревообробки і т. п., утворюються значні обсяги запилених потоків, різних за своїм походженням, властивостями і дисперсним складом пилових продуктів. Основними джерелами пилових викидів є процеси подрібнення, змішування, дозування та транспортування (механічному та пневматичному), аеродинамічного прибирання пилу у виробничих приміщеннях різних за своїм походженням, властивостями і гранулометричним складом.

Фахівцями ПАТ «Северодонецький ОРГХІМ» впроваджені різні за складом та режимними характеристиками пиловловлюючі системи як в Україні та Російській Федерації, так і в республіці Казахстан, що створені на базі моделі ВАЗЗПЦ, що сприяло не тільки поліпшенню умов роботи обслуговуючого персоналу підприємств та екологічного стану довкілля, але й значній економії сировинних матеріалів та матеріальних ресурсів.

Характерним для металургійних підприємств є наявність високих температур, мінливого складу і широкого діапазону пилової концентрації утворюваних аерозолів, виражених абразивних властивостей, широкого асортименту оброблюваних матеріалів та кількості джерел утворення полідисперсного пилу з превалюючим вмістом тонкодисперсних фракцій. З

урахуванням високого рівня негативного впливу на здоров'я людини тонкодисперсних частинок пилу, знепилюючі системи повинні очищувати забруднене повітря з високою ефективністю не тільки від пилу, але й від шкідливих продуктів горіння, що містяться у викидах промислових установок. При створенні аспіраційних систем для таких виробництв на перший план має виходити їх висока сепараційна здатність, а гідравлічні втрати, габаритні розміри та вартість мають бути підпорядковані визначному фактору.

Потенційними об'єктами для широкого впровадження знепилюючих систем ВАЗЗПЦ є також шинні заводи, текстильні виробництва [142], підприємства гумовотехнічних виробів та пластичних мас, вугледобувні комплекси [143, 144], рудні кар'єри та гірничозбагачувальні фабрики, лампові і термометрові заводи, а також установки вогневого методу знешкодження забруднених стічних вод.

Для всіх перерахованих вище потенційних об'єктів впровадження інноваційних пиловловлюючих систем, створюваних на базі моделі ВАЗЗПЦ, є важливою задачею найближчого часу і для цього вже є всі підстави.

1.6 Висновки до першого розділу

В багатьох галузях промисловості країни, зокрема в хімічній, металургійній та будівельній, має місце значна кількість джерел запылюваних потоків, для очищення яких застосовуються різні способи та різноманітне за своєю функціональною ефективністю роботи технологічне обладнання природоохоронного призначення. Найбільш розповсюдженим на промислових підприємствах типом пиловловлюючих пристроїв є циклонні апарати, які за своїми функціональними характеристиками на даний час не в змозі цілком задовільняти більш жорсткі вимоги щодо рівня очищення запылюваних промислових викидів.

Вирішення проблеми скорочення шкідливих викидів знаходиться в області системного дослідження, конструктивної розробки та впровадження нових конструкцій пиловловлюючих пристроїв, наприклад створюваних на базі вихрової апаратури із зустрічними закрученими потоками (ВАЗЗП), які за даними літературних джерел мають більш підвищені показники з ефективності пиловловлювання та питомих енерговитрат.

З розглянутих вище конструкцій відцентрових пиловловлювачів найбільш ефективною та перспективною з точки зору слід вважати типову модель ВАЗЗПЦ – з циліндричною сепараційною камерою. Для вказаної моделі практично вже відомі всі номінальні співвідношення геометричних розмірів, визначені основні технічні характеристики та номінальний діапазон режимних параметрів. Але для цієї моделі пиловловлювача недостатньо визначеним залишається характер впливу вихідних пристроїв на ефективність роботи та рівень енергетичних показників, зокрема вихідного патрубка та бункерної частини. Тому для досягнення поставленої в дисертації мети в якості об'єкту дослідження обирається процес розділення фаз у закручених потоках, та предмету дослідження, в якості якого виступає вихровий апарат із зустрічними закрученими потоками моделі ВАЗЗПЦ (з циліндричною сепараційною камерою).

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Постановка задач дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка високоефективного пиловловлюючого обладнання на базі вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками, зокрема моделі ВАЗЗПЦ (з циліндричною сепараційною камерою), призначеної для виділення пилу із запорошених потоків, що утворюються на промислових виробництвах України.

Для досягнення мети слід вирішити наступні задачі :

- визначити характер впливу режимно-конструктивних параметрів вихідного патрубку на аеродинаміку і гідродинамічні характеристики, загальну ефективність сепарації та гідравлічний опір ;
- визначити вплив геометрії, побудови та умов експлуатації бункерної частини на основні параметри гідродинаміки в сепараційній камері ;
- розробити математичні моделі, що дозволять розраховувати поля швидкостей та визначати рівень сепараційної здатності ;
- визначити основні місця для можливого конструктивного удосконалення типової моделі ВАЗЗПЦ ;
- дослідити гідродинаміку та розробити інноваційну модель ВАЗЗПЦ з підвищеними технічними характеристиками ;
- розробити інженерну методику вибору і розрахунку інноваційної моделі ВАЗЗПЦ для роботи в якості високопродуктивного пиловловлювача ;
- визначити напрямки конструктивної адаптації інноваційної моделі ВАЗЗПЦ стосовно її поліфункціонального використання в якості технологічного обладнання з активною гідродинамікою.

2.2 Типова конструкція циліндричного вихрового апарата

Типова конструкція моделі ВА3ЗПЦ [34] показана на рис. 2.1, а співвідношення геометричних розмірів основних елементів надані в таблиці 2.1.

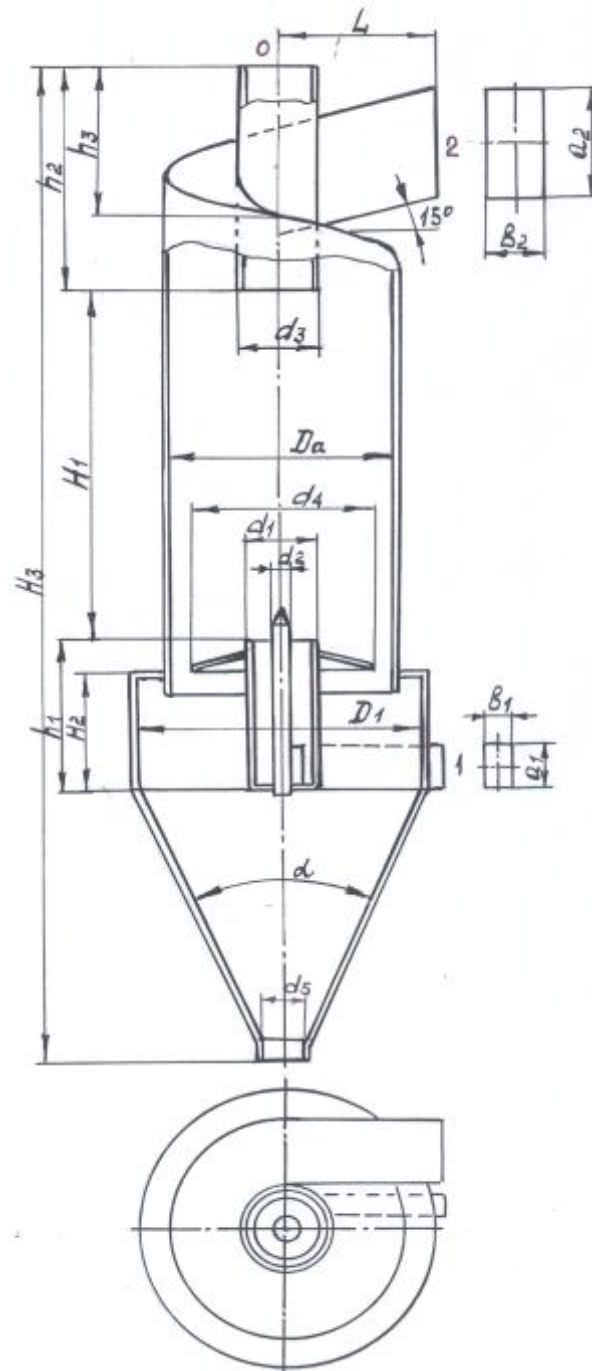


Рис. 2.1 – Типова конструкція апарата моделі ВА3ЗПЦ

Таблиця 2.1

Основні співвідношення розмірів ВАЗЗЩC *)

Умовне позначення	Найменування параметра **)	Співвідношення розмірів (відносно D_a)
D_a	Внутрішній діаметр сепараційної камери	1,00
D_1	Внутрішній діаметр пилозбірника	1,25
d_1	Діаметр завихрувача первинного потоку (внутр.)	0,50
d_2	Діаметр витискувача	0,20
d_3	Діаметр вихідної труби (зовнішній)	0,60
d_4	Діаметр відбійної шайби	0,85
d_5	Діаметр пиловипускного отвору (внутрішній)	0,20
H_1	Висота сепараційної камери	2,00
H_2	Висота циліндричної частини пилозбірника	0,60
H_3	Загальна висота апарата	6,00
h_1	Висота завихрувача первинного потоку	1,20
h_2	Висота вихідного патрубку	1,75
h_3	Висота зовнішньої частини вихідного патрубку	0,31
a_1	Висота патрубка первинного потоку	0,50
a_2	Висота патрубка вторинного потоку	0,66
b_1	Ширина патрубка первинного потоку	0,15
b_2	Ширина патрубка вторинного потоку	0,20
L	Довжина вхідних патрубків	0,70
α	Кут конусності пилозбірника, °	35–40
	Товщина стінки сепараційної камери ***)	

*) Співвідношення вказаних розмірів можуть змінюватися Замовником після узгодження з Розробником апарата ;

**) Невказані розміри елементів апарата приймаються виходячи з конструктивних міркувань.

***) Товщина стінки сепараційної камери та пилозбірника визначається надлишковим тиском (розрідженням), під яким працює апарат.

2.3 Методика дослідження вихрових апаратів

Загальні проблеми порівняльних випробувань пиловловлювачів.

При розробці нових знепилюючих систем, призначених для вирішення конкретних виробничих питань як економічного характеру, так і з захисту навколишнього середовища, виникає необхідність у проведенні порівняльних стендових випробувань пиловловлювачів у заздалегідь встановлених границях режимів. Техніку очищення забруднених потоків характеризує велике різноманіття як принципів дії, так і багатоваріантність конструктивного виконання. З'являються нові більш ефективні відцентрові пиловловлювачі, які з метою встановлення їх дійсних технічних характеристик, вимагають всебічного і поглибленого теоретичного вивчення, а також потребують організації і проведення експериментальних випробувань. З метою одержання репрезентативних даних потрібно застосовувати відповідну методологію, що дозволяє порівнювати різні моделі в однакових умовах. Для цього в якості «опонента» новій конструкції, як правило, підбирається з відомими характеристиками аналог.

Порівняльні випробування відцентрових пиловловлювачів проводять у відповідності з чинною нормативною документацією, що містить правила, вимоги та рекомендації. Всі відомі на даний час порівнювальні методики, як вітчизняні, так і закордонні, побудовані практично однаково. Так, розроблена Ленінградським науково– дослідним інститутом охорони праці Єдина методика порівняльних випробувань пиловловлювачів [19] (далі – ЄМ) застосовується для порівняння різних пиловловлюючих пристроїв, у тому числі й відцентрові дії – циклонів і ВА із зустрічними закрученими потоками. Вказана методика на даний час є доступною в застосуванні і дозволяє одержати репрезентативні дані при визначенні основних параметрів випробовуваних пристроїв природоохоронного призначення, у тому числі і вихрових пиловловлювачів із зустрічними закрученими потоками.

Згідно ЄМ експериментальне випробування пиловловлювачів в лабораторних умовах повинно здійснюватися на штучно запиленому тестовим пилом повітрі з відповідними параметрами.

В якості випробуваних моделей можуть бути задіяні апарати з діаметром, не меншим, ніж у перших номерів типорозмірного ряду. Для моделі ВАЗЗПЦ мінімальний діаметр сепараційної камери дорівнює $D_a = 100$ мм.

Типові контрольно-вимірювальні засоби, а також оригінальні пристрої перевіряються згідно чинних на час випробувань інструкцій Комітету стандартів, мір та вимірювальних приладів України.

Аналіз дисперсного складу пилу, а також підготовка контрольних проб проводяться у відповідності з Методикою аналізу дисперсного складу промислового пилу в процесах газоочищення [123–126], а при застосуванні каскадних імпакторів [127, 128]), керуються інструкцією [129].

Експериментальний пил і запилення повітря. Для штучного запилення повітря, що подається у порівнюванні парати, застосовується кварцевий пил різного дисперсного складу, який отримують шляхом помелу на спеціальних вібраційних млинах. Штучно запилене повітря подається у пиловловлювачі у диспергованому стані.

Наважка попередньо висушеного тестового пилу, необхідна для проведення одного досліду, визначається виходячи з розрахункової вихідної концентрації пилу, витрати повітря та тривалості дослідів.

Комплекс експериментальних досліджень пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ проводився як на спеціальних стендових установках з використанням технічного обладнання спеціалізованої науково-дослідної лабораторії ПАТ «Северодонецький ОРГХІМ», а також у виробничих умовах на різних підприємствах.

2.4 Експериментальні стенди та установки

Загальний вигляд науково-дослідної лабораторії ПАТ «Севродонецький ОРХІМ» показаний на рис. 2.2.



Рис. 2.2 – Науково-дослідна лабораторія з дослідження ВАЗЗПЦ

Стенд для експериментальних випробувань пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ методом штучного запилення повітря показаний на рис. 2.3.

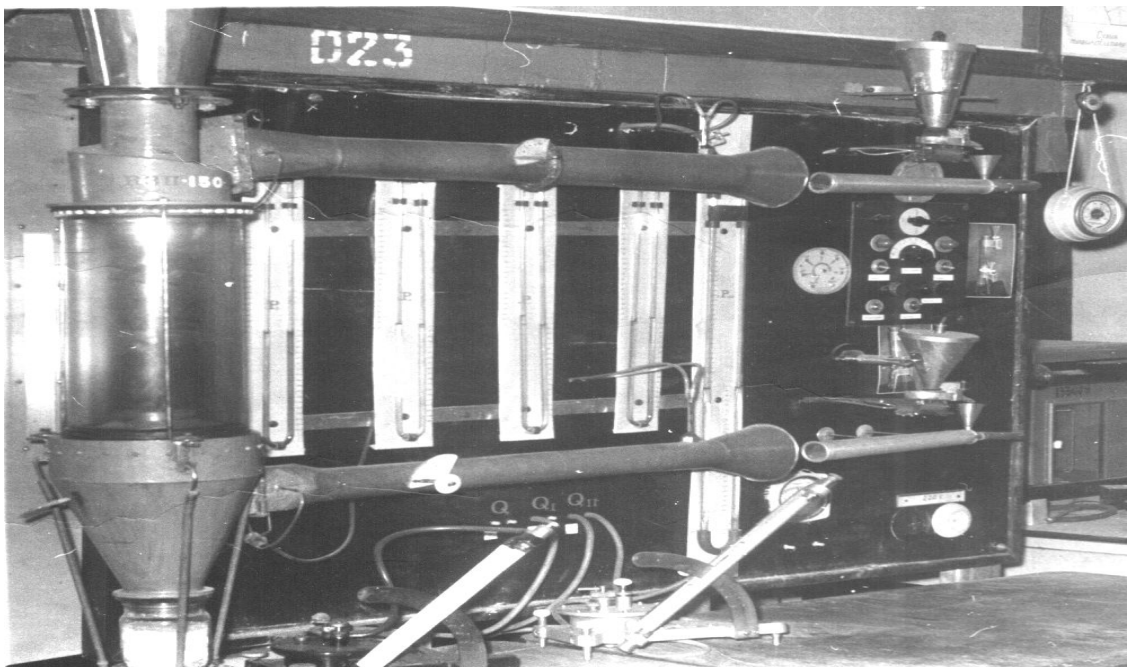


Рис. 2.3 – Загальний вигляд лабораторного стенда для випробування пиловловлювачів ВАЗЗПЦ на ефективність методом штучного запилення

Лабораторний стенд постачений відповідною функціональною елементною базою, передбаченою ЄМ, а також комплексом додаткових спеціалізованих пристроїв для забезпечення функціонування під час проведення випробувань. Конструкції окремих пристосувань визначались характеристиками тестового пилю та умовами проведення дослідів.

Перед подачею в досліджуваний апарат тестовий пилю попередньо піддавався спеціальній підготовці за допомогою системи пилоприготування,

При розробці нових чи реконструкції вже існуючих аспіраційних систем визначальним аспектом для продовження процесу проектування виступають знання дійсних технологічних характеристик і специфічних особливостей джерела утворення пилових викидів на виробництві. З метою їх визначення в практиці досліджень вдаються до експериментального випробування проектованої моделі ВАЗЗПЦ безпосередньо у виробничих умовах [130]. Для цього була створена універсальна мобільна установка, схема якої показана на рис. 2.4.

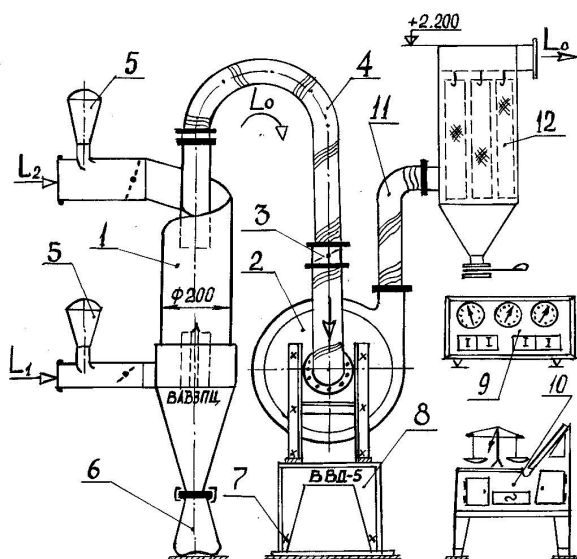


Рис. 2.4 – Схема мобільної установки :

- 1 – модель ВАЗЗПЦ; 2 – вентилятор ВВД-5 ; 3 – регулятор витрати повітря; 4, 11 – гнучкі повітропроводи ; 5 – система штучного запилення ; 6 – пилозбірник ; 7 – кріплення ; 8 – опорна рама ; 9 – блок вимірювальний ; 10 – система пилоприготування та аналізів ; 12 – фільтр санітарного очищення.

Універсальна мобільна установка у розібраному стані доставляється на місце проведення експерименту, де збирається, обв'язується відповідними повітропроводами, постачається необхідними контрольно-вимірювальними

які створюють швидкісне струменеве витікання потоку і руйнують пилові агломерати до одиночних частинок, а при русі через дифузори 4, сприяють вирівнюванню концентрації пилу по перерізу вхідних повітропроводів до моменту надходження в сепараційну камеру апарата.

Дистанційне регулювання загальної витрати штучно запиленого повітря через випробуваний пиловловлювач здійснювалось шиберною заслінкою 8, встановленою на загальному колекторі між всмоктуючим патрубком вентилятора 2 і вихідним патрубком апарата. Висушування тестового пилу здійснювалось у сушильній шафі 9, а лабораторні терези 11 з достатньою точністю зважування ($\pm 0,01$ г) дозволяли готувати наважки пилу як до початку експерименту, так і визначати кількість уловленого пилу після проведення досліду.

Пил, що уловлювався у досліджуваній моделі ВАЗЗПЦ протягом досліду чи серії дослідів, накопичувався в герметизованій пилозбірній ємкості 6, закріпленій на пиловипускному штуцері апарата.

При проведенні всіх дослідів, методом зовнішньої фільтрації проводилось дублювання рівня запиленості контрольними замірами на виході з апарата.

Ефективність очищення запырошених потоків у випробуваній моделі ВАЗЗПЦ визначалась різними способами. Одним з найбільш вживаних є експериментальний спосіб визначення ефективності сепарації по співвідношенню кількості уловленого пилу до кількості пилу, що надійшов в апарат протягом досліду (серії дослідів) :

$$\eta_0 = (G_{\text{ул.}} / G_n) \cdot 100, \% \quad (2.1)$$

де η_0 – загальний ступінь очищення повітря у випробовуваному пиловловлювачі, % ;

$G_{\text{ул.}}$, G_n – маса уловленого в апараті пилу і подаваного відповідно.

Для відбору пилових проб непрямим способом застосовувались пилозбірні трубки внутрішньої або зовнішньої фільтрації. При цьому

відбір проб з повітропроводів проводився з дотриманням принципу ізокінетичності у відповідності з чинними методиками [132–134]. Для ізокінетичного відбору проб пилу з газоходів різних діаметрів і поперечного перерізу у виробничих умовах використовувався універсальний портативний блок приладів ПОУ–1 [131].

Ступінь винесення пилу з досліджуваного апарата визначалась по формулі :

$$\varepsilon = (100 - \eta_0) = \frac{G_n - G_{ул.}}{G_n} \cdot 100, \% \quad (2.2)$$

Ступінь очищення запиленого потоку пиловловлювачем по вхідній і вихідній концентраціях пилу визначалась по формулі :

$$\eta = (1 - Z_{вих.}/Z_{вх.})100, \% \quad (2.3)$$

де $Z_{вх.}$, $Z_{вих.}$ – середня протягом дослідження концентрація пилу в повітрі до і після пиловловлювача, г/м³.

Фракційна ефективність пиловловлювачів ВАЗЗПЦ визначалась по формулі :

$$\eta_{\phi_i} = \frac{\Phi'_{\phi} \cdot \eta_0}{\Phi_{\phi}} = \frac{\Phi_{\phi} - \Phi''_{\phi} \cdot \varepsilon}{\Phi_{\phi}}, \% \quad (2.4)$$

де Φ_{ϕ} , Φ'_{ϕ} , Φ''_{ϕ} – кількість даної фракції пилу відповідно на вході в пиловловлювач, в улові та у виносі відповідно, %

ε – ступінь винесення пилу, %.

В залежності від обраного методу визначення запиленості пилогазового потоку здійснювалася підготовка вимірювального стенду.

При цьому перш за все визначалися аеродинамічні характеристики даного режиму, такі як швидкість потоків, загальна витрата повітря, кратність потоків. Потім, згідно отриманих дослідних даних, визначалась ефективність пиловловлювання в залежності від характеру дослідження, тобто по масі уловлених і поданих наважок пилу або виходячи з рівня концентрацій.

Перевірка міри достовірності отриманих результатів здійснювалась методами математичної статистики [138–140].

2.4.2 Випробування на енергетичні втрати

Принципальна схема вимірювального стенду показана на рис. 2.6.

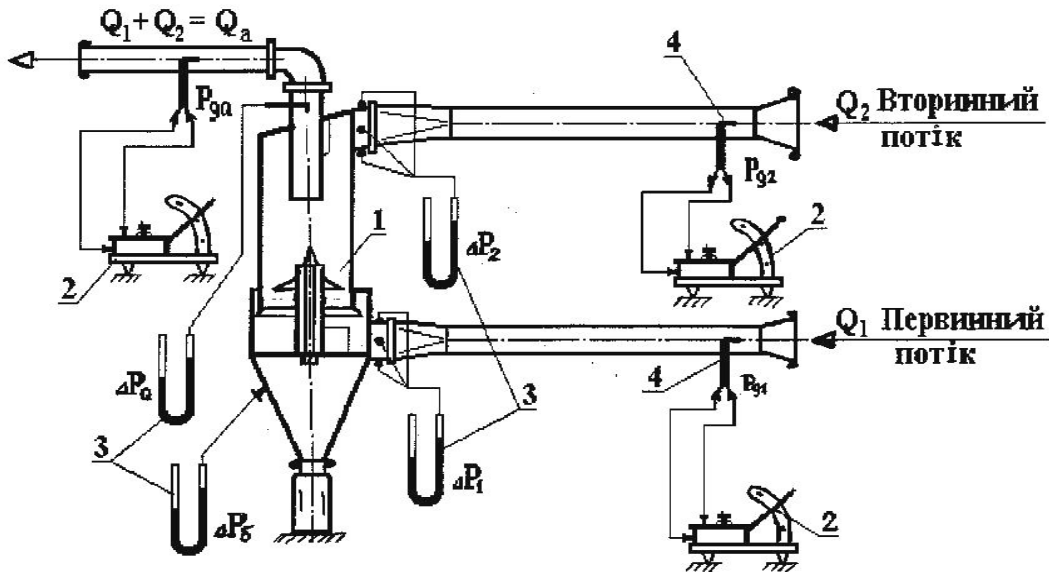


Рис. 2.6 – Принципальна схема вимірювального стенду :
 1 – модель ВАЗЗПЦ ; 2 – мікроманометр з нахиленою трубкою ММН–250 ; 3 – U–образний мікроманометр ; 4 – пневмометрична трубка конструкції НПОГАЗ.

Вимірювання проводяться у такий спосіб.

У досліджувану модель апарата 1 за допомогою відцентрового вентилятора високого тиску подається розрахункова кількість атмосферного повітря і після стабілізації витратного режиму протягом п'яти хвилин, проводяться відповідні виміри параметрів : швидкості руху потоків в розрахунковій точці, величин витрати повітря та втрат тиску.

В якості засобів контролю і вимірювання задіяні: мікроманометри з нахиленою трубкою типа ММН–250 2, U–образні диференціальні мікроманометри 3, пневмометричні трубки 4, термометр, психрометр.

Тиск (розрідження) у повітропроводах та бункері апарата вимірюється U-образними мікроманометрами, заповненими підфарбованою рідиною (етиловим спиртом або дистильованою водою).

Витрата повітря визначається до і після випробуваного апарата за допомогою датчиків статичних і динамічних напорів – пневмометричних трубок 4 конструкції НІОГАЗ, працюючих в комплекті з мікроманометрами типа ММН–250.

Швидкість повітря в каналах визначається пневмометричними трубками, що вводяться безпосередньо у потік, у сукупності з мікроманометрами з нахиленою трубкою.

Вимірювання швидкості руху і витрати повітря здійснюється у відповідних точках прямолінійних ділянок повітропроводів.

Гідравлічний опір вимірюється по перепаду повних тисків у відповідних перерізах до і після досліджуваного апарата.

Для вимірювання величини статичного тиску у повітропроводах передбачені приймачі тиску у вигляді отворів діаметром 1 мм в стінках повітропроводів. Ці отвори постачені спеціальними штуцерами для підключення до них гумових або пластикових шлангів.

Визначення аеродинамічних характеристик ВАЗЗПЦ здійснюється у відповідності з програмою дослідження. Отримані результати вимірювань (дослідів) піддавалися аналізу на достовірність і відтворюваність методами математичної статистики, що стисло викладені в підрозділі 2.5.

Для проведення наступної серії дослідів стенд переналагоджується на інші умови експерименту.

Розрахунки загального гідравлічного опору моделі ВАЗЗПЦ, а також коефіцієнта гідравлічного опору, в залежності від витрати повітря та кратності потоків по каналах здійснювались методом, викладеним в роботах [96, 135].

Всі вимірювальні прилади, що використовувались при проведенні вимірів з визначення режимних параметрів або були таровані на спеціальних

стендах з визначенням відповідних коефіцієнтів (наприклад, пневмометричних трубок конструкції НПОГАЗ для вимірювання швидкісного натиску повітряних потоків в каналах повітропроводів, всередині каналів випробуваних моделей ВАЗЗПЦ тощо, а також тарований шаровий зонд), або, в залежності від потрібної точності вимірювання та виду вимірювального параметру, мали відповідний клас точності : для точних вимірів – 1,5, для грубих – 2,5. Спеціальні засоби для вимірювань, що виготовлялися індивідуально, на дослідницькому стенді за своїми параметрами зпівставлялись з такими, що були попередньо тарованими (зразковими), з наступним визначенням коефіцієнта спеціального приладу.

2.5 Методика обробки результатів досліджень

Фізичні експерименти проведено шляхом експериментальних досліджень на лабораторних установках та виконані на базі застосування методів обробки експериментальних даних.

Визначення кількості вимірів, похибки вимірів та результатів розрахунку основних гідродинамічних параметрів та характеристик в досліджуваних зонах моделей апаратів базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях [138–140] щодо підготовки і проведення інженерного експерименту та статистичної обробки отриманих даних.

Визначення оптимально необхідної кількості дослідів. Для досягнення найвищої достовірності й точності одержаних результатів експерименту та їх обробки застосовувались методи математичної статистики [138, 140].

При проведенні окремих дослідів (чи їх серії) з необхідними точністю та достовірністю, визначалась потрібна кількість вимірів (n), при яких виникала впевненість у позитивному результаті. Для цього попередньо обчислювалось середньоквадратичне відхилення σ^2 (дисперсія) :

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}, \quad (2.5)$$

де x_i – значення одиночного параметра ;

\bar{x} – середнє арифметичне значення ;

n – число паралельних вимірів.

Встановлювались потрібна точність вимірювання ($\pm \delta$) (довірчий інтервал) та $\Delta = \sigma_0 / X$ (довірчий інтервал похибки вимірювання в %), який мусив бути не меншим за клас точності вимірювального приладу. При цьому середня похибка вимірювання обчислювалася по виразу $\sigma_0 = \sigma / \sqrt{n}$.

Мінімальна кількість паралельних вимірювань (дослідів), що забезпечувало коректність отриманих результатів з потрібними точністю та достовірністю, обчислювалася по формулі :

$$n_{\min} = \frac{\sigma^2 \cdot t^2}{\sigma_0^2} = \frac{K_b \cdot t^2}{\Delta^2}, \quad (2.6)$$

де t – нормоване відхилення (приймається в межах від $t = 2$ при малій точності вимірювань, до $t = 3$ при великій точності) ; $K_b = \sigma / X, \%, \Delta, \%$

При $n > 30$ середнє значення даної сукупності вимірів x достатньо наближається до його істинного значення.

Виключення грубих помилок ряду. При проведенні експериментів можливо виникнення двох видів помилок – випадкових та систематичних, які значно впливають на точність отриманих результатів. Аналіз таких помилок можливий при середньоквадратичному відхиленні σ , що обчислюється по формулі [139]:

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}. \quad (2.7)$$

Найбільш можлива помилка окремого виміру для дослідів з малою точністю визначалася за правилом «трьох сигм» ($\Delta = 3\sigma$) [139], а для точних вимірювань – визначенням двостороннього довірчого інтервалу за умови влучення його в довірчий інтервал $P_0 = 95\%$ [139] :

$$\varepsilon = t_p \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.8)$$

де t_p – критерій Стьюдента.

Середньоквадратична погрішність непрямих вимірів :

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}, \quad (2.9)$$

де $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Зниження впливу систематичних помилок на результати здійснювалось таруванням приладів та періодичним контролем їхніх показань порівнянням із зразковими приладами.

Оцінка відтворюваності вимірів. При проведенні відповідальних експериментів, пов'язаних з отриманням експериментальних даних для проведення порівнювального аналізу різних моделей апаратів, методом визначення розрахункового критерія Кохрена ($K_{кр}$) проводилась перевірка вимірювань на повторюваність в певних границях вимірювань із завданою довірчою достовірністю. Величина критерія Кохрена визначалась по формулі [138, 140]:

$$K_{кр} = \frac{\max \sigma^2}{\sum_{i=1}^m \sigma_i^2}, \quad (2.10)$$

де $\max \sigma^2$ – найбільше числове значення дисперсії з числа паралельних серій вимірювань (дослідів) ; m – число паралельних дослідів ;

σ^2 – дисперсія генеральної сукупності (статистичного ряду) ; $\sum_{i=1}^m \sigma_i^2$ – сума дисперсій m серій.

Досліди вважались такими, що відтворюються, за умови :

$$K_{кр} \leq K_{кр}, \quad (2.11)$$

де $K_{кр}$ – табличне значення критерія Кохрена.

Апроксимація графічних результатів дослідів аналітичними виразами здійснювалась методами «середніх» та «найменших квадратів» [138,140].

2.6 Висновки до другого розділу

Об'єктом дослідження виступає процес розділення фаз у закручених потоках, а предметом дослідження визначена типова модель вихрового апарата із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою, як модель, що має певні перспективи з використання в якості високоефективного пристрою для очищення заповнених промислових викидів.

Для дослідження і отримання репрезентативних даних використані основні положення, вимоги та рекомендації Єдиної методики [19], що застосовується для дослідження та порівняльних випробувань апаратів циклонного типу, фільтрів та інших знепилюючих пристроїв.

Для отримання експериментальних даних з основних режимно-конструктивних параметрів створені спеціальні стаціонарні стенди та мобільні установки, постачені необхідними типовими вимірювальними приладами та спеціалізованими функціональними системами.

Методика проведення дослідів з визначення основних гідродинамічних характеристик, а також даних щодо загальної ефективності пиловловлювання та гідравлічного опору, як типової моделі ВАЗЗПЦ, так і випробуваних модифікованих конструкцій, перевірка на ступінь довіри до результатів експерименту та їх аналіз мали єдиний підхід з чинною методикою дослідження апаратів циклонного типу.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Особливості гідродинаміки вихрових апаратів

Принцип дії вихрового пиловловлювача заснований на взаємодії двох закручених у один бік і зустрічно направлених потоків повітря, в якому знаходяться частинки пилу. В результуючому закрученому потоці всі частинки полідисперсного пилу знаходяться під дією системи сил, з яких визначними для процесу сепарації є відцентрова сила та сила лобового опору. Знання величини та співвідношення цих сил, а також розподілення їх по висоті сепараційної камери апарата дає можливість проведення розрахунку ступеня ефективності пиловловлювання. З іншого боку, тверда частинка, що виділяється у закрученому потоці, має досить складну траєкторію руху, яка є функцією величини та співвідношення швидкостей : радіальної, тангенціальної та осьової. Знання величини та напрямку кожної з цих сил є основною задачею при проектуванні пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ.

Особливістю гідродинаміки вихрового апарата є те, що при роботі в якості пиловловлювача його результуюча ефективність залежить від інтенсивності обертання (ступеня крутки) і співвідношення потоків (кратності), що подаються по каналах, їх витрата. Впливають також визначні конструктивні параметри сепараційної камери апарата, співвідношення розмірів його основних елементів, наприклад діаметра і висоти сепараційної камери, діаметра і глибини занурення вихідного патрубку тощо. До уваги приймаються також і характеристики пилу, що підлягає уловлюванню, та умови його видалення з бункера тощо. На ефективності пиловловлювання позначаються також й зовнішні умови, зокрема параметри навколишнього середовища (температура, вологість), пульсації очищеного повітря,

взаємовплив апаратів при їх сумісній роботі в групах чи батареях. Визначення полів швидкостей є завданням математичного моделювання.

3.2 Математичні моделі вихрових апаратів

Теоретичний аналіз циркуляційних потоків та їх можливих комбінацій є дуже складним. Але для кращого розуміння суті цілком достатньо визначитися з класифікацією найпростіших видів потоків та їх властивостями.

При розгляді картини в системі зустрічних закручених потоків оперують поняттями потенційного та вихрового потоків.

Потенційний потік. Теорема Гельмгольца наголошує : «Рух будь-якої точки потоку можна розглядати як результат складання поступального руху по траєкторії разом з деякою початковою точкою, обертального руху навколо осі, що проходить через початкову точку, і деформаційного руху, який у свою чергу складається з лінійної деформації та деформації скошування».

Рух потоку, що проходить без обертання частинок, є потенційним.

В потенційному потоці законом тангенціальних швидкостей, отриманим з потенціалу швидкості φ (через відношення $V = grad\varphi$), є :

$$V_{\varphi} = c \cdot r^{-1}. \quad (3.1)$$

Якщо ж прийняти r й φ як полярні координати з полюсом у центрі обертання, то для тангенціальної швидкості отримаємо вираз :

$$V_{\varphi} = r \frac{\partial \varphi}{\partial t} = r \cdot \omega, \quad (3.2)$$

де t – час, с,

ω – кутова швидкість обертання, рад/с.

З рівнянь (3.1, 3.2) витікає :

$$V_{\varphi} = r \cdot \omega = \frac{c}{r}, \quad (3.3)$$

або

$$\omega = \frac{c}{r^2}, \quad (3.4)$$

тобто кутова швидкість обертання закрученого потоку не є постійною і сильно залежить від відстані r .

Вихровий потік. Цей вид руху характеризується тим, що закон розподілення тангенціальних швидкостей V_φ виражається рівнянням прямої :

$$V_\varphi = c \cdot r. \quad (3.5)$$

Константа C в при цьому дорівнює незалежній від радіуса r кутовій швидкості ω (рад/с).

Відповідно до рівняння (3.4) можна записати :

$$V_\varphi = r \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = r \cdot \omega. \quad (3.6)$$

Іншою особливістю цього руху є те, що тверді частинки, які приймають участь в вихровій течії, при кожному оберті навколо осі обертаються також навколо себе, тобто рух відбувається за законом твердого тіла.

Оберткові потоки. Комбінація потенційного потоку з вихровим, що обертається у той же бік, показана на рис. 3.1.

Потенційний потік протікає по внутрішній поверхні стінки посудини по низхідній гвинтовій лінії зверху вниз, на днищі він гальмується і по спіральній траєкторії стягується до центру. Тобто, на днищі утворюється плоский вихровий стік, який тверді частинки, що знаходяться в потоці, транспортує у напрямку до осі обертання.

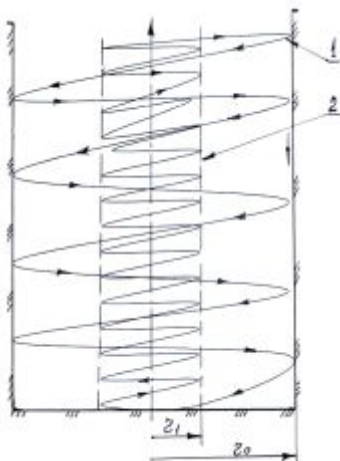


Рис. 3.1 – Система зустрічних оберткових потоків :

1 – потенційний потік ; 2 – вихровий потік

Потенційний потік протікає по внутрішній поверхні стінки посудини по низхідній гвинтовій лінії зверху вниз, на днищі він гальмується і по спіральній

траєкторії стягується до центру. Тобто, на днищі утворюється плоский вихровий стік, який будь-які тверді частинки, що знаходяться в потоці, транспортує до осі обертання. Над вихровим стоком в посудині утворюється коаксіальний вихровий потік, направлений знизу вгору, і обертається у той же бік, що й потенційний.

Якщо уявити в плані поперечний переріз обертового потоку, то загальна картина має вигляд, показаний на рис. 3.2.

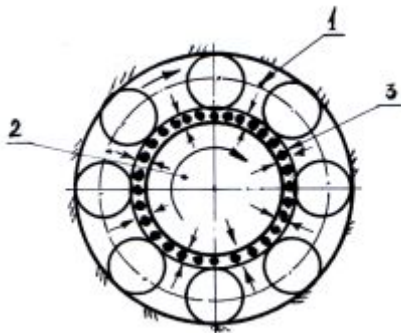


Рис. 3.2 – Поперечний переріз системи зустрічних обертових потоків : 1 – потенційний потік ;
2 – вихровий потік ; 3 – змішаний шар.

В центрі обертання потоку здійснюється за законом твердого тіла – $V_t = C \cdot r$ (2 – область вихрового потоку), а біля стінок (1) закон руху виражається через $V_t = \frac{c}{r}$ (1 – область потенційного потоку). Між цими чітко вираженими областями лежить проміжна область – так званий змішаний шар (3).

Зовні розташовані направлені вниз складові потенційного потоку, а всередині – вертикально вверх направлені складові вихрового потоку.

Під дією системи сил тверді частинки у змішаний шар переходять як з потенційного, так і з вихрового потоків. Змішаний шар в площині обертання являє собою подвійний вихровий шар, частина якого з боку вихрового потоку виражена більш чітко, бо зменшення швидкості з боку потенційного потоку значно швидше, чим з боку вихрового.

Слід зазначити, що в сепараційній камері пиловловлювача моделі ВАЗЗПЦ утворюється подібна система, що складається з двох закручених потоків – низхідного потенційного, що обертається у периферійній частині сепараційної камери, та висхідного вихрового потоку, що утворюється завихрувачем первинного потоку і обертається всередині потенційного.

Частинки пилу відокремлюються від аерозолі і досягають стінки сепараційної камери під сумісною дією відцентрових сил та сил лобового опору.

Вивчення й більш поглиблений аналіз особливостей гідродинаміки як в сепараційній камері, так і у вихідному патрубку моделі ВАЗЗПЦ, а також визначення впливу режимно-конструктивних параметрів вихідного патрубка та інших функціональних елементів на ефективність пиловловлювання, з урахуванням властивостей та особливостей системи зустрічних закручених потоків, можна здійснити методами математичного моделювання.

3.2.1 Поле швидкостей

Встановлено, що в приосьовій зоні тангенціальні швидкості розподіляються за законом обертання твердого тіла [16, 115]. Спочатку була прийнята модель такого руху, однак допущення про рівномірний розподіл радіальної швидкості по висоті сепараційної камери у більшості випадків не відповідає дійсній картині течії.

В даній роботі використана модель узагальненого розподілу радіальної швидкості, яка прийнята в роботі [53]. Однак, прийнята в ній модель розрахунку тангенціальних швидкостей, що базується на емпіричних даних, причому з єдиним підходом для внутрішніх та зовнішніх шарів, нами замінена на теоретичний підхід, що ґрунтується на збереженні моменту кількості руху. На рис. 3.3 показана розрахункова схема моделі ВАЗЗПЦ.

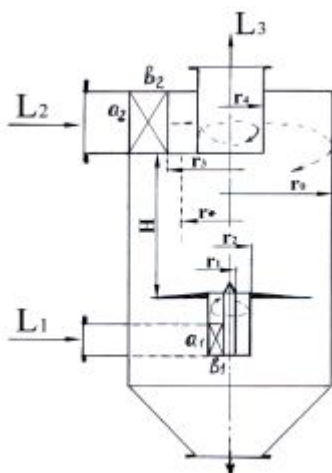


Рис. 3.3 – Розрахункова схема моделі ВАЗЗПЦ

Згідно [53] зміна інтенсивності змішування вторинного потоку з первинним по висоті сепараційної

камери (H), в якості узагальненої залежності зміни радіальної швидкості має вид :

$$V_r(r_*, z) = -A(H - z)^k, \quad (3.7)$$

де z – вертикальна координата, відрахована вгору від верхнього рівня відбійної шайби ; H – висота сепараційної камери ; A, k – емпіричні коефіцієнти.

З (3.7) виходить, що при $k = 0$ радіальна швидкість розподіляється так, як прийнято раніше ; при $k \geq 0$ радіальна швидкість потоку наростає донизу, а при $k \leq 0$ радіальна швидкість зменшується донизу.

Коефіцієнт A у (3.7) можна визначити з балансної умови :

$$\int V_r(r_*, z) \cdot 2\pi \cdot r_* \cdot dr = L_2. \quad (3.8)$$

З (3.7, 3.8) виходить :

$$A = \frac{L_2(k+1)}{2\pi \cdot r_* \cdot H^{k+1}}. \quad (3.9)$$

Зміна витрати вторинного потоку по висоті сепараційної камери відповідає зміні витрати первинного потоку. Причому, вторинний потік при русі зверху донизу зменшується при злитті з первинним потоком, а витрата первинного потоку збільшується при русі знизу вгору :

$$dL_2(z) = dL_1(z_1) = -V_r(r_*) \cdot 2\pi \cdot r_* \cdot dz. \quad (3.10)$$

Для розв'язання диференціального рівняння (3.10) підставимо V_{r*} з (3.7) і A з (3.9). Розв'язок відносно $L_1(z)$, при початковій умові $z=0$, $L_1(z) = L_1$ дає :

$$L_1(z) = L_1 + L_2 \left[1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{k+1} \right]. \quad (3.11)$$

Замінімо $L_2 = \varepsilon \cdot L_1$ і отримаємо рівняння в іншому вигляді (ε – співвідношення потоків L_2 / L_1) :

$$L_1(z) = L_1 \left[1 + \varepsilon \left(1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{k+1}\right) \right] = L_1 \left[(1 + \varepsilon) - \varepsilon \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{k+1} \right]. \quad (3.12)$$

Аналогічно, при початковій умові, отримано рівняння розрахунку $L_2(z)$

$$L_2(z) = L_2 \left[1 - \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right]. \quad (3.13)$$

Середнє по перерізу значення осьових швидкостей розрахуємо з (3.12) та (3.13)

$$V_{s_1} = \frac{L}{S_1} \left[(1 + \varepsilon) - \varepsilon \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right], \quad (3.14)$$

$$V_{s_2} = \frac{L}{S_2} \left[1 - \left(1 - \frac{z}{H} \right)^{k+1} \right]. \quad (3.15)$$

Радіальні складові швидкості були визначені з рівняння нерозривності

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot V_r) + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0. \quad (3.16)$$

Підстановкою значень осьової швидкості окремо для внутрішнього та зовнішнього шару, з урахуванням граничних умов отримаємо радіальні швидкості :

– внутрішній потік ($r = 0, V_r = 0$) :

$$V_{r_1} = - \frac{L_2(k+1)}{2S_1 \cdot H} \left(1 - \frac{z}{H} \right)^k \cdot r; \quad (3.17)$$

– зовнішній потік ($r = 0, V_r = 0$) :

$$V_{r_2} = \frac{L_2 \cdot (k+1)}{2S_2 \cdot H} \cdot \frac{r_0^2 - r^2}{r} \left(1 - \frac{z}{H} \right)^k. \quad (3.18)$$

В цитованій роботі [53] рівняння розрахунку тангенціальних швидкостей отримані у вигляді залежності з використанням експериментальних даних. Емпіричний підхід не є достатньо виправданим на даному етапі досліджень. Більш доцільним є теоретичний метод на основі збереження моменту кількості руху. В роботі [100] отримана узагальнена залежність тангенціальних складових швидкості вихрового апарата у внутрішньому та зовнішньому шарах :

$$V_{\varphi_1} = \omega_1(z) \cdot r, \quad (3.19)$$

$$V_{\varphi_2} = \omega_1(z) \cdot \frac{r_*^2}{r}, \quad (3.20)$$

де $\omega_1(z)$ – кутова швидкість обертання внутрішнього шару на висоті (z) від первинного завихривача.

Рівняння (3.19) відповідає закону обертання твердого тіла, а рівняння (3.20) – закону потенційного обертання.

Для виконання проектних розрахунків необхідно знати кутову швидкість обертання потоку $\omega_1(z)$. Рівняння моменту кількості руху газу, який проходить через довільний переріз сепараційної камери на певній висоті (z) у внутрішньому шарі :

$$M_1(z) = \int_0^{r_*} \rho V_{s1} \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \cdot \omega_1(z) \cdot r^2. \quad (3.21)$$

Радіус поверхні розділення потоків r_* приблизно дорівнює радіусу вихідного патрубку $r_* = r_4$. Інтегруючи (3.21) в межах $0 - r_*$, матимемо :

$$M_1(z) = 2\pi \cdot \rho V_{z1} \cdot \frac{r_*^4}{H}. \quad (3.22)$$

При $z = H$; $\omega_1(z) = C_0$ – кутова швидкість обертання потоку у вихідному патрубку.

Підстановка значень, $r = r_4$ приводить до рівняння :

$$M_1(z = H) = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{L_1(1 + \varepsilon)}{r_*^2} \cdot \omega_1(z) \cdot r_4^2 = M_{ex}. \quad (3.23)$$

Розв'язавши (3.23) відносно $\omega_1(H) = C_0$, отримаємо :

$$C_0 = \frac{2M_{ex} \cdot r_*^2}{\rho \cdot L_1(1 + \varepsilon) \cdot r_4^4}. \quad (3.24)$$

При $r_* = r_4$:

$$C_0 = \frac{2M_{ex}}{\rho \cdot L_1(1 + \varepsilon) \cdot r_4^2}. \quad (3.25)$$

Значення поточного $\omega_1(z)$, використовуючи рівняння моментів кількості руху в прирощеннях :

$$\frac{\Delta M_1}{\Delta z} = \frac{dM_1}{dz}, \quad (3.26)$$

де $M_1(z)$ – (3.21).

$$M_z = \rho \cdot \left| V_{r_*} \right| \cdot 2\pi \cdot r_* \cdot \Delta z \cdot V_{r_*} \cdot r_*, \quad (3.27)$$

$$\frac{dM_1(z)}{dz} = \frac{d}{dz} \left[2\pi \cdot \rho V_{z_1} \cdot \omega_1(z) \frac{r_*^4}{H} \right] = \frac{\Delta M_z}{\Delta z} = \rho \cdot \left| V_{r_*} \right| \cdot 2\pi \cdot r_*^2 \cdot \vartheta_{\varphi_*}. \quad (3.28)$$

Після перетворення :

$$\frac{H \cdot V_{r_*}}{r_*^2} \cdot V_{\varphi_*} = \omega_1(z) \frac{dV_{z_1}}{dz} + V_{z_1} \frac{d\omega_1(z)}{dz}. \quad (3.29)$$

Підстановка V_{z_1} і V_{r_*} приводить (3.26) до виду :

$$\frac{d\omega_1(z)}{\omega_1(z)} = \frac{(k+1) \left(1 - \frac{z}{H}\right)^k \cdot dz}{H \left[(1+\varepsilon) - \varepsilon \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{k+1} \right]}. \quad (3.30)$$

Інтегрування з перетворенням дає поточне значення $\omega_1(z)$:

$$\omega_1(z) = \left| \left[\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon} \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{k+1} - 1 \right]^{\frac{1}{\varepsilon}} \right|. \quad (3.31)$$

Таким чином, використовуючи отримані рівняння осьової та радіальної складових швидкості, можна визначити їх значення у будь-якій точці простору сепараційної камери моделі ВАЗЗПЦ. Тангенціальна складова визначається виходячи із закону зберігання моменту кількості руху.

В роботі [107] розроблений удосконалений метод розрахунку полів швидкостей моделі ВАЗЗПЦ, знайдені певні підходи до інтегрування, які не призводять до появи громіздких рівнянь розрахунку складових загальної структури потоків, які в подальшому використовуються для розрахунку фракційної ефективності. Порівняння теоретичних розрахунків з експериментальними даними показали достатньо високу точність для розрахунку тангенціальної та осьової складових швидкості. Для визначення радіальної швидкості V_r точність розрахунку є відносно низькою, але через занадто малі абсолютні значення V_r , аналітичні вирази доцільно використовувати в інженерній практиці при проведенні попередніх

розрахунків, або у прогнозуванні при розробці нових конструкцій відцентрових пиловловлювачів.

3.3 Розрахунок фракційної і загальної ефективності пиловловлювання

При проектуванні нових пиловловлюючих систем, створюваних на базі ВАЗЗПЦ, або при реконструкції існуючих аспіраційних систем важливо мати дані з фракційної ефективності апаратів, що входять до складу конкретних технологічних установок.

Відомі методи розрахунку фракційної ефективності вихрових апаратів передбачають використання досить громіздких розрахунків, що часто дають результати, які принаймні не можуть бути прийняті в якості вихідних для подальшого успішного проектування. А використання експериментальних даних є цілком доцільним для уточнення та спрощення математичних залежностей.

В роботі [99] були запропоновані формули для розрахунку фракційної ефективності, але практика впровадження ВАЗЗПЦ показала, що вони застосовні лише для прогнозування відносно невеликих типорозмірів. Внаслідок малої точності при розкладенні в ряд одержані рівняння дають дуже великі розбіги при переході від одного розміру частинок до поряд розташованих.

В роботі [108] раніше одержані залежності розрахунку фракційної ефективності ВАЗЗПЦ були уточнені з метою підвищення рівня їх прогнозованості. Позначення величин, що входять в поточні математичні формули, відповідають наданим в п. 3.2.1 та на рис. 3.3.

Як було встановлено раніше, в закрученому потоці на тверді частинки одночасно діють відцентрова сила ($m \cdot \omega^2 \cdot r$) і сила опору потоку ($3\pi \cdot d \cdot \mu \cdot \frac{dr}{dt}$), при цьому частинки рухаються в радіальному напрямку із

змінною швидкістю (dr/dt). Крім того, частинки певного розміру зносяться також до центру радіальним стоком.

Рівняння руху частинок в закрученому потоці витікає з рівняння Ньютона :

$$m \cdot \omega^2 \cdot r = 3\pi \cdot d \cdot \mu \cdot \left(\frac{dr}{dt} - v_r \right). \quad (3.32)$$

Величини складових рівняння (3.30) залежать від місця знаходження частинок, наприклад, у внутрішньому шарі ($r_* > r > 0$), або у зовнішньому шарі ($r_0 > r > r_*$), де r, r_0, r_* – радіуси потоку, сепараційної камери апарата, зони розділення первинного та вторинного потоків відповідно.

Експериментальними дослідженнями [115] встановлено, що у зовнішньому шарі газ рухається по закону потенційної течії ($V_\varphi \cdot r = \kappa = \text{const}$), а у внутрішньому шарі його рух визначає закон обертання твердого тіла ($\omega \cdot r = V_\varphi$).

Ймовірність уловлювання частинок пилу окремо у зовнішньому і внутрішньому шарі може бути визначена виходячи з наступного.

Зовнішній шар.

Складові рівняння (3.30) одержані в роботах [100, 119] :

$$\omega_1(z) = C_0 \left(\frac{\left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)}{L_3} \right), \quad (3.33)$$

$$\omega = \omega_1(z) \frac{r_*^2}{r^2} = C_0 \left(\frac{\left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)}{L_3} \right) \frac{r_*^2}{r^2}, \quad (3.34)$$

$$V_{z_2} = - \frac{L_2 z}{\pi H (r_0^2 - r_*^2)}, \quad (3.35)$$

$$V_{r_2} = \frac{L_2 (r^2 - r_0^2)}{2\pi H (r_0^2 - r_*^2) r}. \quad (3.36)$$

Підстановка значень з (3.34, 3.36) у (3.32) приводить до рівнянь :

$$\frac{dr}{dt} = \frac{m\omega^2 r}{3\pi d\mu} + V_r. \quad (3.37)$$

Зазначимо, що

$$dt = \frac{dz}{V_z}, \quad \frac{dr}{dt} = V_z \frac{dr}{dz}. \quad (3.38)$$

Підставивши з (3.38) в (3.37), отримаємо :

$$V_z \frac{dr}{dz} = \frac{\frac{1}{6}\pi d^3 \rho_T \omega^2 r}{3\pi d\mu} + \frac{L_2(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)} r. \quad (3.39)$$

Підстановка значень V_z і ω із (3.34, 3.35) приводить до рівняння :

$$V_z = \frac{L_2 z}{\pi H(r_0^2 - r_*^2)} \frac{dr}{dz} = \frac{d^2 \rho_T}{18\mu} C_o \left[\frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{L_3} \right] + \frac{L_2(r^2 - r_0^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)} r. \quad (3.40)$$

Змінимо напрям z для зовнішнього шару зверху вниз, по напрямку потоку зверху-вниз. Тоді знак $(-)$ перед V_z зміниться на знак $(+)$.

Перетворимо рівняння (3.40) до вигляду, зручного для інтегрування з виносом (r) у ліву частину, а (z) у праву :

$$r^3 dr = \frac{d^2 \rho_T C_o^2 r_*^4}{18\mu} \left[\frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{L_3} \right]^2 dz \frac{\pi H(r_0^2 - r_*^2)}{L_2 z} + \frac{L_2(r^2 - r_0^2)r^2 \pi H(r_0^2 - r_*^2)}{2\pi H(r_0^2 - r_*^2)L_2 z} dz. \quad (3.41)$$

Після скорочення :

$$r^3 dr = \frac{d^2 \rho_T}{18\mu} C_o^2 r_*^4 \frac{\left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)^2}{L_3^2} \frac{\pi(r_0^2 - r_*^2)}{\frac{L_2 z}{H}} dz + \frac{(r^2 - r_0^2)r^2 dz}{2z}. \quad (3.42)$$

Перетворення :

$$\frac{\left(L_1 + L_2 \frac{z}{H} \right)^2}{\frac{L_2 z}{H}} = \frac{L_1^2 + 2L_1 L_2 \frac{z}{H} + \left(L_2 \frac{z}{H} \right)^2}{\frac{L_2 z}{H}}. \quad (3.43)$$

Інтегрування складових призводить до рівняння :

$$\int \frac{L_1^2 H}{L_2 z} = \frac{L_1^2 H}{L_2} \int \frac{dz}{z} = \frac{L_1^2 H}{L_2} \ln z \Big|_0^H. \quad (3.44)$$

Розкладання в ряд :

$$\begin{aligned} \ln z &= \left[(z-1) - \frac{(z-1)^2}{2} + \frac{(z-1)^3}{3} - \frac{(z-1)^4}{4} + \frac{(z-1)^5}{5} \right]_0^H = \\ &= \left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} + \frac{(H-1)^5}{5} + 2,283 \right], \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\int_0^H 2L_1 dz = 2L_1 z \Big|_0^H = 2L_1 H, \quad (3.46)$$

$$\int_0^H L_2 \frac{z}{H} = \frac{L_2}{H} \frac{z^2}{2} \Big|_0^H = \frac{L_2 H}{2}, \quad (3.47)$$

$$\int_r^{r_0} r^3 dr = \frac{r_0^4 - r^4}{4}. \quad (3.48)$$

Підстановка значень інтегрування (3.48) у (3.42) дає рівняння :

$$\begin{aligned} \frac{r_0^4 - r^4}{4} &= d^2 \frac{\pi \rho_T C_0^2 r_*^4 (r_0 + r_*) (r_0 - r_*)}{18 \mu L_3^2} \times \left\{ 2L_1 H + \frac{L_2 H}{2} + \frac{L_1^2 H}{L_2} \left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \right. \right. \\ &+ \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} + \frac{(H-1)^5}{5} + 2,283 \left. \right] + \frac{(r^2 - r_0^2) r^2}{2} \left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \right. \\ &\left. \left. - \frac{(H-1)^4}{4} + \frac{(H-1)^5}{5} + 2,283 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (3.49)$$

Позначимо :

$$\left[(H-1) - \frac{(H-1)^2}{2} + \frac{(H-1)^3}{3} - \frac{(H-1)^4}{4} + \frac{(H-1)^5}{5} + 2,283 \right] = f(H_1), \quad (3.50)$$

$$2L_1 H + \frac{L_2 H}{2} \cdot f(H_1) = f(H). \quad (3.51)$$

Перетворення квадратичних функцій :

$$r_0^4 - r^4 = (r_0 - r) \cdot (r_0 + r) \cdot (r_0^2 + r^2), \quad (3.52)$$

$$r_0^2 - r_*^2 = (r_0 - r_*) \cdot (r_0 + r_*). \quad (3.53)$$

Перетворення до вигляду :

$$\frac{r_0 - r}{r_0 - r_*} = d^2 \frac{2\pi\rho_T c_0^2 r_*^4 (r_0 + r_*) f(H)}{9\mu L_3^2 (r_0 + r) \cdot (r_0^2 + r^2)} + \frac{(r^2 - r_0^2) r^2 f(H_1)}{2(r_0 + r_{cp}) \cdot (r_0^2 + r_{cp}^2) \cdot (r^2 - r_*)}. \quad (3.54)$$

Відношення $\frac{r_0 - r}{r_0 - r_*}$ є ймовірністю уловлювання частинки, яка відповідає

за своїми параметрами певній орбіті обертання [119]. При $r = r_{cp} = \frac{r_0 + r_*}{r}$ матимемо рівняння для визначення середньої фракційної ефективності пиловловлювання :

$$\eta_{сер2} = d^2 \cdot \frac{2\pi\rho_T c_0^2 r_*^4 (r_0 + r_*) f(H)}{9\mu L_3^2 (r_0 + r_{cp}) \cdot (r_0^2 + r_{cp}^2)} + \frac{(r_{cp_2}^2 - r_1^2) r^2 \cdot f(H_1)}{2(r_0 + r_{cp_2}) \cdot (r_0^2 + r_{cp_2}^2) \cdot (r_0 - r_*)}. \quad (3.55)$$

Внутрішній шар.

Рівняння руху і у внутрішньому шарі відповідає формулі (3.44).

Складові рівняння (3.32) наведені в роботі [100], які за деякими перетвореннями приводяться до наступного виду :

$$V_{z1} = \frac{L_1 + L_2 \frac{z}{H}}{\pi r_*^2} ; \quad V_{r1} = -\frac{L_2 r}{2\pi r_*^2 H}. \quad (3.56)$$

Підстановка в рівняння (3.32) з подальшою заміною складових, розділенням змінних та інтегруванням складових приводить до виразів :

$$1 - \eta = \frac{1}{\exp A}, \quad (3.57)$$

$$A = d^2 \cdot \frac{\rho_T \pi r_*^2}{18\mu L_3^2} \cdot C_0^2 \cdot H \cdot \left(L_1 + \frac{L_2}{2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{L_1 + L_2}{L_1} \right), \quad (3.58)$$

Загальна ефективність пиловловлювання :

$$\eta = \frac{\exp A - 1}{\exp A}. \quad (3.59)$$

Таким чином, отримані рівняння (3.57–3.59) для розрахунку середньої фракційної ефективності та загального коефіцієнта очищення, що враховують вплив режимно-конструктивних параметрів і дозволяють з прийнятною для інженерних розрахунків точністю оцінити пиловловлюючу здатність вихрового пиловловлювача.

3.4 Розрахунок енергетичних втрат вихрових апаратів

Важливою складовою економічності моделі ВАЗЗПЦ є її гідравлічний опір. Знання перепаду тиску і впливаючих на нього чинників є необхідною умовою для прогнозування рівня енергоспоживання, а також його зменшення шляхом вибору номінальних режимно-конструктивних параметрів пиловловювача. Рівень енергоспоживання насамперед впливає на вибір потужності електроприводу та типорозміру тягодуттєвого агрегата (вентилятора), а також надає можливість проводити об'єктивну оцінку ефективності питомих витрат енергії при розробці альтернативних варіантів аспіраційних систем.

Чисельні аналітичні дослідження [12, 55, 96, 97] причин гідравлічних втрат у вихрових пиловловлювачах свідчать, що втрата потоком кінетичної енергії безпосередньо в сепараційному просторі апарата є визначальною. Багатьма дослідниками вважається, що в розрахунках лише ця втрата і повинна враховуватись. Слід, однак, зауважити, що гідравлічні втрати, пов'язані з входом та рухом очищеного потоку в проточній частині вихідного патрубку, а також розкручуванням його за межами пиловловлювача, складають досить істотну частку від загальних втрат [11].

Втрати кінетичної енергії у вхідних каналах ВАЗЗПЦ – це насамперед втрати у підвідних патрубках та регуляторах витрати, які, як правило, встановлюються на відстані від місця входу в сепараційну камеру не менше ніж за 10 калібрів перерізу повітропроводу. Крім того, тип завихрувача також впливає на рівень гідравлічних втрат, як і опір місцевих переходів, колін, розгалужень.

Втрати енергії на вході в сепараційну камеру обумовлені розширенням потоків, що надходять з первинного та вторинного завихрувачів, втратою швидкості і, як наслідок підвищенням тиску. Мінімізації цих втрат сприяє застосування конструкцій завихрувачів з безударним входом – уліточних, тангенціальних з гвинтовою кришкою та інших, а також плавним

перетворенням форми поперечного перерізу підвідного каналу по його довжині.

Взаємодія зустрічно направлених обертових потоків супроводжується зміною напрямків руху як в радіальному, так і в осьовому напрямках, градієнтами швидкості, турбулентністю, утворенням мікрівихорів, перепадом тиску, тертям всередині потоків та об стінки сепараційної камери. Рівень енергетичних втрат визначається характером гідродинаміки в сепараційній камері: чим більші продуктивність з очищеного повітря та кратність вхідних потоків, тим вище і рівень гідравлічного опору. Визначення частки впливу окремих гідродинамічних чинників на загальні гідравлічні втрати в сепараційній камері вихрового пиловловлювача має відомі утруднення.

Встановлено [12, 15, 101, 103], що гідродинаміка обертового потоку у вихідному патрубку та його гідравлічний опір безпосередньо пов'язані з параметрами утворюваної в сепараційній камері результуючої течії. Кількісні показники цих параметрів визначаються перепускною здатністю, закруткою результуючого вихора, кратністю потоків, концентрацією твердої фази, а також геометрією головних елементів апарата. При цьому в залежності від характеру гідродинаміки сепараційного простору, в проточній частині вихідного патрубка, позбавленого всередині будь-яких пристроїв, спостерігаються різні за структурою обертові течії, які характеризуються певним полем тисків, напрямком руху, величиною і співвідношенням тангенціальної, осьової та радіальної складових швидкості [103].

Експериментальними дослідженнями доведено, що загальні гідравлічні втрати у вихідному патрубку складаються з втрат тиску на вході внаслідок різкої зміни напрямку руху частки вторинного потоку безпосередньо під нижнім зрізом, втрат уздовж проточної частини циліндричного каналу через тертя потоку об шорстку поверхню стінки, а також втрат, обумовлених наявністю в патрубку чи на виході з нього різного роду гасителів обертання, призначених для спрямлення та зміни напрямку руху очищеного потоку [120].

Так, установка конічного багатолопатевого розкручувача на рівні нижнього зрізу вихідного патрубку приводить до повного випрямлення обертового потоку, який вже на вході в проточний канал вихідного патрубку набуває прямооточного руху. Однак при цьому значна частка кінетичної енергії обертового потоку за рахунок його гальмування перетворюється в енергію тиску. При цьому перетворення починається вже на початковій ділянці руху очищеного потоку, що адекватно зростанню загального гідравлічного опору вихідного патрубку внаслідок зменшення його прохідного перерізу при однаковій витраті повітря.

Гідравлічний опір відцентрових пиловловлювачів розраховують з використанням коефіцієнтів опору, величина яких визначається конструкцією пиловловлювача. Такий метод розрахунку є оціночним і недостатньо точним для визначення рівня енерговтрат при розробці принципіально нових чи модернізованих моделей ВАЗЗПЦ.

Метод теоретичного розрахунку циклонних пиловловлювачів був запропонований ще в п'ятдесятих роках минулого століття німецьким дослідником Вальтером Бартом [121]. Концепція його методу розрахунку полягає в роздільному визначенні опору : на вході – від завихрувача до центрального вихору, на виході – в центральному вихорі і в вихідному патрубку. Метод стосується виключно однопоточних циклонів, тому він не враховує особливостей гідродинаміки зустрічних закручених потоків. Але цей недолік практично відсутній в роботі [122], де авторами пропонується метод розрахунку гідравлічних втрат, який дозволяє враховувати геометрію визначних функціональних елементів моделі ВАЗЗПЦ.

Приклад розрахунку енерговтрат для моделі ВАЗЗПЦ–400, виконаний з використанням даного методу, наведений в Додатку А.

3.5 Висновки до третього розділу

Проведений аналіз особливостей гідро- і аеродинаміки вихрових апаратів та їх математичних моделей. Виходячи з закону збереження моменту кількості руху розроблена математична модель з визначення полів швидкостей у будь-якому місці робочого простору сепараційної камери пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ, а також уточнений метод розрахунку фракційної ефективності пиловловлювання. Розглянуті також методи визначення гідравлічного опору моделі ВАЗЗПЦ.

Основні научні положення розділу опубліковані в працях [101], [103], [104], [105], [107], [108], [110], [111], [112], [118], [122].

РОЗДІЛ 4

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Оцінка впливу вихідних пристроїв на гідродинаміку, ефективність пиловловлювання та енергетичні втрати

4.1.1 Вихідний патрубок

Вихідний патрубок є одним з найважливіших конструктивних елементів вихрових пиловловлювачів, в якому продовжуються ті процеси, що протікають в сепараційній камері. Вивчення особливостей гідродинаміки потоків, що утворюються в проточній частині вихідного патрубку та їх вплив на гідродинамічні параметри пиловловлювача моделі ВАЗЗПЦ є актуальною задачею [120].

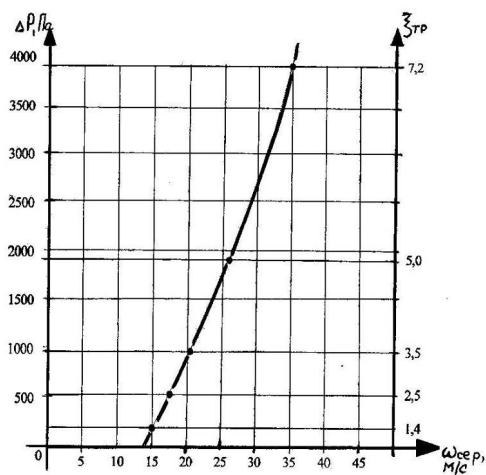


Рис. 4.1 – Залежність втрат тиску ΔP і коефіцієнта гідравлічного опору вихідного патрубку $\xi_{гр}$ від середньої швидкості потоку $V_{сер}$ моделі ВАЗЗПЦ–200

Як видно з рис. 4.1, при номінальній пропускній здатності з повітря $V_{сер}$ через апарат, загальні гідравлічні втрати ΔP у вихідному патрубку збільшуються, також зростає і коефіцієнт гідравлічного опору, при зменшенні поперечного перерізу проточної частини вихідного патрубку. Так, при мінімальній осевій швидкості потоку у вихідному патрубку, яка дорівнює $\omega = 15$ м/с, коефіцієнт гідравлічного опору дорівнює $\xi = 1,4$, при цьому втрати тиску в сепараційній камері будуть

складати $\Delta P = 220$ Па.

При максимальній швидкості потоку $V = 35$ м/с ці ж параметри зростають до рівня $\xi = 7,2$, $\Delta P = 4000$ Па. Слід зазначити, що середня осьова швидкість потоку у проточній частині вихідного патрубка моделі ВАЗЗПЦ не повинна перевищувати 35 м/с, бо при вищих витратах повітря здійснювати процес сепарації частинок пилу в пиловловлювачі стає економічно не вигідним через надто високе енергоспоживання.

Таким чином, при незмінній витраті повітря через ВАЗЗПЦ, зменшення площі проточного каналу вихідного патрубка призводить до різкого зростання гідравлічного опору, а збільшення коефіцієнту гідравлічного опору вихідного патрубка обумовлено інтенсивним обертотурбулентним вихором уздовж його проточної частини.

Експериментально випробувані пристрої для розкручування обертотурбулентних потоків [120] дають можливість зробити висновок, що лише розкручувачі типу «улітка» можуть бути рекомендовані для використання в аспіраційних установках з використанням моделі ВАЗЗПЦ.

Експериментальні випробування як типових циклонів, так і ВАЗЗПЦ, з патрубками з позитивною та негативною конусністю показали, що вихідний патрубок з розширенням в бік руху потоку (дифузор) сприяє зменшенню втрат тиску внаслідок того, що потік, який розширюється, не притискується відцентровими силами до стінки патрубку. Однак, експериментальні дані [120] дозволяють стверджувати, що рівень гідравлічних втрат обумовлений насамперед зворотними течіями і високою турбулентністю безпосередньо в проточній частині вихідного патрубку при високошвидкісному обертанні потоку, що відводиться.

В практиці сухого очищення запиленних потоків найширше розповсюдження отримали пристрої у вигляді кінцевого уліточного розкручувача, який окрім плавної стабілізації обертотурбулентного потоку змінює й напрямок руху, що є особливо важливим при необхідності розташування аспіраційної системи в обмежених у просторі виробничних умовах. Доцільно

всі типові відцентрові пиловловлювачі постачати розкручуючими улітками, які особливо ефективні при груповій компоновці одиночних апаратів у аспіраційних системах, а також при розробці компактних комбінованих установок. При необхідності відбору певної частки вже очищеного потоку для технологічних потреб використовують подвійні уліточні розкручувачі, які практично не призводять до зростання гідравлічних втрат у поодиноких пиловловлювачах, а в групових та батарейних агрегатах сприяють зниженню питомих енерговитрат. Практика свідчить, що уліточні розкручувачі, передбачені безпосередньо за вихідним патрубком ВАЗЗПЦ, є досить простими по конструкції і сприяють стійкості гідродинамічного режиму в сепараційній камері (робочому просторі) апарата практично у всьому діапазоні його робочих параметрів.

Слід відзначити той факт, що в багатьох випадках ті конструктивні рішення інноваційного характеру, які є прийнятними для підвищення ефективності роботи однопотоківих циклонів, для вихрових пиловловлювачів, в тому числі і для моделі ВАВЗПЦ [147], часто негативно впливають на їх основні характеристики.

В ході експериментальних досліджень був виявлений характер руху закрученого потоку в проточній частині вихідного патрубка. Дослідження проводились в однакових умовах з використанням трьох типорозмірів моделі ВАЗЗПЦ : 100, 200 і 400 мм.

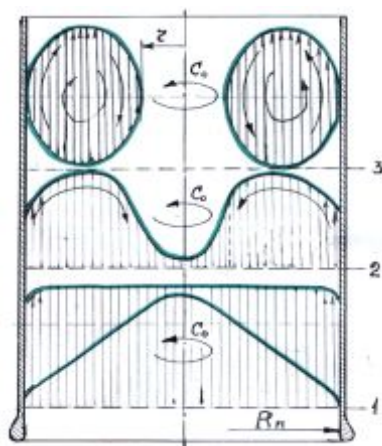


Рис. 4.2 ілюструє характерні течії, що утворюються в проточній частині вихідного патрубка в залежності від гідродинамічних режимів, утворених в сепараційній камері моделі ВАЗЗПЦ.

Рис. 4.2 – Характер течій у вихідному патрубку в залежності від ступеня закрученості потоку в сепараційній камері ВАЗЗПЦ:

1 – слабо закручений; 2 – помірно закручений; 3 – сильно закручений.

Як відомо, ступінь закрученності обертового потоку характеризується співвідношенням тангенціальної і аксіальної складової швидкості [116]. Якщо таке співвідношення є мінімальним (переважання аксіальної складової швидкості над тангенціальною), то ми будемо спостерігати картину течії (1), характерну для слабо закрученого потоку. Цей характер течії супроводжується утворенням полів осьових швидкостей, що відповідає гідродинамічного режиму «виносу» [130] в сепараційній камері ВАЗЗПЦ (при кратності потоків $K=(0,65-0,70)$). Рівень гідравлічних втрат у вихідному патрубку в цьому випадку мінімальний і визначається лише тертям потоку об стінки.

Режим «зваженого шару», організований в сепараційній камері (при $K = (0,70-0,75)$), ілюструє картина течій (2), коли по осі вихідного патрубку з'являється характерна для закрученого потоку воронка з пониженим в приосьовій частині тиском і початком утворення зворотних токів. При існуванні помірно закрученого потоку гідравлічні втрати у вихідному патрубку значно вищі в порівнянні зі слабо закрученим.

Для сильно закрученого потоку (при $K = (0,75-0,80)$), який надходить з сепараційної камери у проточну частину вихідного патрубку, характерно утворення вихрової течії тороїдального профілю із цілком замкнутим контуром зворотних токів (3) і максимальним падінням тиску приосьовій зоні. При цьому режимі, навіть при незначному збільшенні загальної витрати повітря, спостерігається різке зростання гідравлічних втрат, що обумовлено дуже сильною турбулізацією потоку і значним тертям його об внутрішню поверхню стінки вихідного патрубку.

Для пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ визначені найбільш прийнятні з точки зору балансу загальної ефективності пиловловлювання та енерговитрат межі умовної швидкості потоку в сепараційній камері : нижня – $V_a = 4,0$ м/с, верхня – $V_a = 8,85$ м/с. У зазначеному діапазоні умовних швидкостей і були проведені експериментальні дослідження з визначення гідравлічних втрат в вихідному патрубку.

На рис. 4.3 показані криві, що відображають гідравлічні втрати (ΔP) і питомі енерговитрати (E) у вихідному патрубку в залежності від середньої швидкості ($V_{п}$, $V_{а}$) потоків.

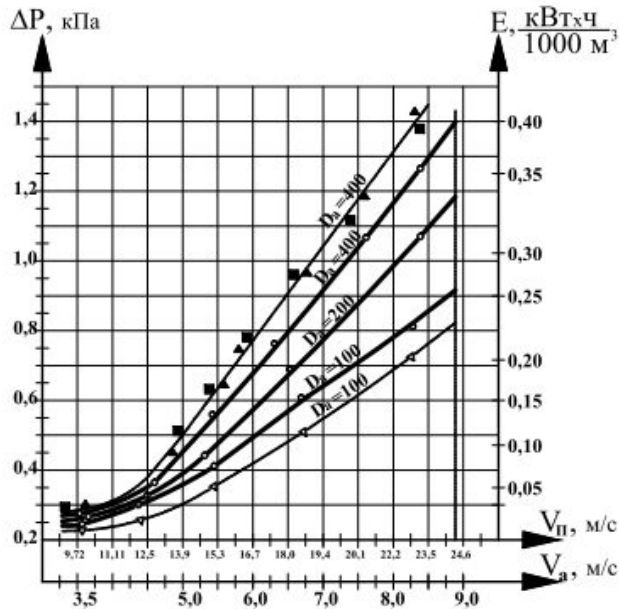


Рис. 4.3 – Гідравлічні втрати (P) і питомі енерговитрати (E) у вихідному патрубку в залежності від швидкості ($V_{п}$, $V_{а}$) потоків :

- – без розкручуючих пристроїв ;
- ▽ – з розкручувачем типа «улітка» ;
- , ▲ – з іншими розкручувачами

практично у всьому діапазоні умовних швидкостей. Для всіх інших конструкцій раскручувачів характерне зростання питомих енерговитрат, особливо при великих середніх швидкостях потоків ($V_{а}$), що відповідають максимальній продуктивності з очищеного повітря. Слід зазначити, що й для інших типорозмірів ВАЗЗПЦ криві енерговитрат (позначені тонкими лініями) мають подібний характер.

На рис. 4.4 показані експериментальні криві, що характеризують загальні втрати тиску та енергоефективність трьох типорозмірів моделі ВАЗЗПЦ.

Гідравлічні втрати були визначені для трьох типорозмірів ВАЗЗПЦ (100, 200 і 400 мм), без розкручуючих пристроїв (○), з окремими типами розкручуючих пристроїв для моделі 400 мм (■, ▲), а також розкручуючим пристроєм типа «улітка» (▽) для моделі діаметром 100 мм. Гідродинамічний режим в сепараційній камері моделі ВАЗЗПЦ відповідав при цьому режиму «ефективного пило вловлювання», тобто при при кратності $K = 0,80$. Як видно з графіків, лише уліточні розкручувачі, які встановлені безпосередньо на вихідному патрубку, сприяли зниженню рівня гідравлічних втрат

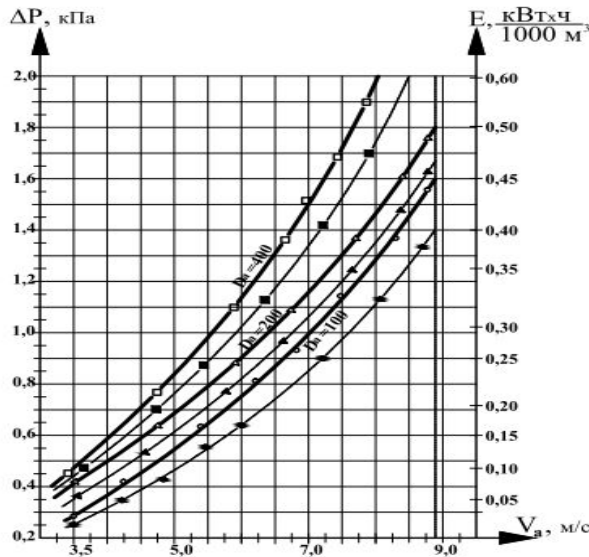


Рис. 4.4 – Загальні втрати тиску в ВАЗЗПЦ (діаметром 0,1; 0,2; 0,4 м):
 □, Δ, ○ – без розкручуючи пристроїв ;
 ■, ▲, ● – з розкручуючим пристроєм
 типа «улітка».

Як видно з рис. 4.4, практично у всьому діапазоні продуктивності кожного з типорозмірів, застосування уліточних розкручувачів призводить до зниження загальних гідравлічних втрат, або енерговитрат на пиловловлювання. Слід зазначити, що отримані експериментальні дані є цілком винятковими і стосуються лише пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ одиночного виконання, які працюють «в мережі», вони не розповсюджуються на апарати інших моделей, наприклад з конічною сепараційною камерою, а також таких, що працюють на «вихлоп», тобто у вільний простір.

Теоретичні розрахунки гідравлічних втрат в пиловловлювачах ВАЗЗПЦ, що засновані на концепції Вальтера Барта, проводились по наступних залежностях, розроблених керівником за участю автора :

$$\Delta P_{вх} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{V_{\varphi a}^2 \cdot r_a}{r_4} - \frac{V_{\varphi 4}^2 \cdot r_4}{r_a} + V_{\varphi 4}^2 \right), \quad \Delta P_{вих} = \frac{\rho}{2} \cdot V_{s4}^2 \left[K \left(\frac{V_{\varphi 4}}{V_{s4}} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{V_{\varphi 4}}{V_{s4}} \right)^2 \right].$$

де V_{φ} , V_z – тангенціальна і аксіальна швидкість потоку відповідно, м/с ;

a – відноситься до сепараційної камери ; 4 – відноситься до вихідного патрубку ; $K = 4,4$ – парціальний коефіцієнт моделі ВАЗЗПЦ.

На рис. 4.5 показаний графік збігу теоретичних розрахунків з експериментальними даними, визначеними для моделі ВАЗЗПЦ–400 при кратності потоків по каналах $K = 0,80$ (режим активного пиловловлювання).

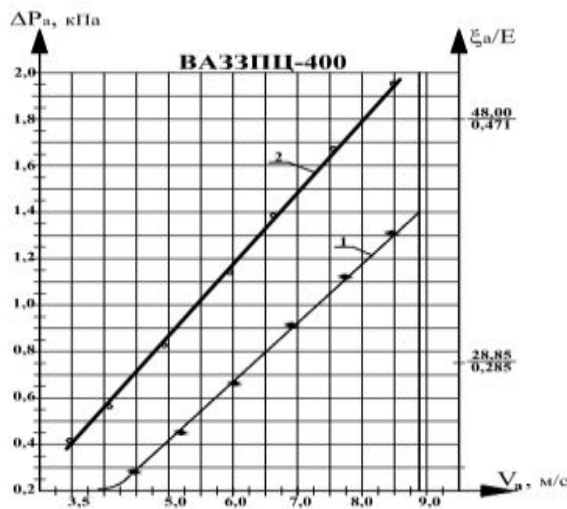


Рис. 4.5 – Графік збігу теоретичних і експериментальних даних з визначення гідравлічних втрат в моделі ВАЗЗПЦ-400 :

- 1 – за теоретичними розрахунками ;
- 2 – за експериментальними даними.

(основної складової шихти скляного виробництва з параметрами : $d_{50} = 18$ мкм; $\sigma_{п}^1 = 5,0$; $\rho_{п} = 2100$ кг/м³) при кратності потоків $K = 0,80$ (режим ефективного пиловловлювання) показані на рис. 4.6.

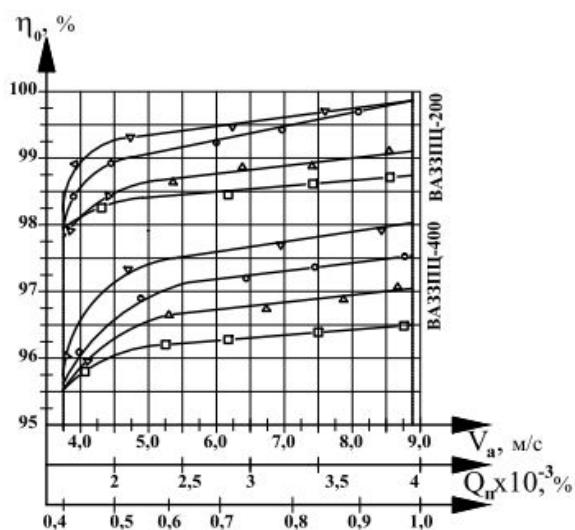


Рис. 4.6 – Загальна ефективність пиловловлювання моделями ВАЗЗПЦ-200 і ВАЗЗПЦ-400 :

- – без розкручуючих пристроїв ;
- ∇ – з розкручувачем типу «улітка» ;
- Δ, □ – з іншими розкручувачами ;

Як видно з рис. 4.6, застосування уліточних розкручуючих пристроїв типу «улітка» сприяє підвищенню загальної ефективності пиловловлювання у всьому діапазоні продуктивності моделі ВАЗЗПЦ, що обумовлено

Для кожного з визначених режимних параметрів ВАЗЗПЦ-400 були визначені коефіцієнти кореляції, з допомогою яких можна дані теоретичних розрахунків для будь-якого типорозміру привести ці режимні параметри до найбільш прогнозованих у відповідних умовах експлуатації.

З метою визначення загальної ефективності пиловловлювання у виробничих умовах були випробувані два типорозміри – діаметром 0,2 та 0,4 м. Результати з визначення загальної ефективності уловлювання пилю доломіта

насамперед підвищеною стійкістю гідродинамічного режиму всередині сепараційної камери. Використання інших конструктивних типів розкручувачів негативно впливає на загальну ефективність роботи пиловловлювачів внаслідок зворотного впливу гідродинамічного режиму, утвореного у вихідному патрубку, на режим пиловловлювання в сепараційній камері.

Тобто, для підвищення ефективності пиловловлювання ВАЗЗПЦ та зниження питомих енерговитрат можуть бути рекомендовані уліточні розкручувачі потоків.

4.1.2 Пиловбірний бункер

Криві залежності величини розрідження в бункерах моделі ВАЗЗПЦ одиночного виконання, вимірювані при кратності відношення потоків $K = 0,8$ для трьох типорозмірів, в межах номінальних робочих швидкостей повітря, показані на рис. 4.7.

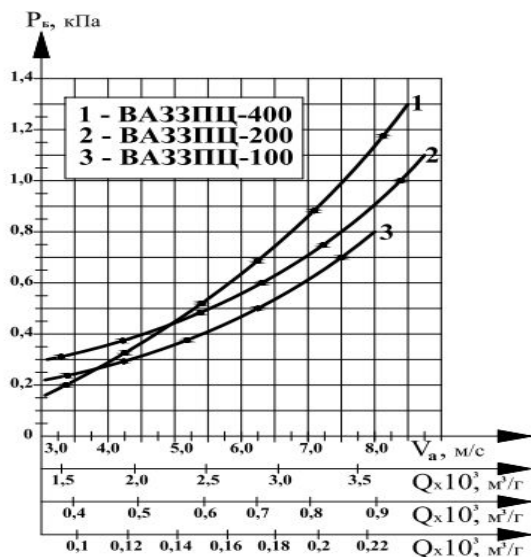


Рис. 4.7 – Залежність величини розрідження в бункерній частині ВАЗЗПЦ

Слід зауважити, що від величини розрідження в бункері моделі ВАЗЗПЦ, залежить не тільки товщина стінки бункера, але й

загальна кількість повітря, що може потрапляти в сепараційну камеру у разі порушення герметичності на рівні пиловипускного отвору. Попадаючи іззовні в порожнину бункера і рухаючись через пиловипускний отвір, потік

повітря, з одного боку, аерує пил, що знаходиться в штуцері, підвищуючи таким чином його текучість і попереджуючи пробкоутворення в ньому. З іншого боку, рухаючись вгору, повітряний потік створює відому перешкоду вільному осадженню пилу, що зсипається, а при виході у порожнину сепараційної камери він перешкоджає видаленню пилу з неї на рівні відбійної шайби. При великій кількості підсмоктувань може трапитись повне перекриття кільцевої щілини, через яку відсепарований пил надходить в бункер. У цьому випадку ВАЗЗПЦ повністю припиняє свою роботу в якості пиловловлювача і весь пил, що міститься у запыреному повітрі, направляється за його межі.

Експериментально встановлено, що у випадку утворення зовнішніх підсмоктувань повітря, ступінь зниження загальної ефективності роботи ВАЗЗПЦ за інших рівних умов є функцією пропускної здатності пиловловлювача, кратності потоків, концентрації частинок в запыленому повітрі та конструктивного оформлення бункера. В середньому, кожному з (1–2)% підсмоктувань від загального обсягу очищуваного повітря відповідають (1,5–2) % зниження загальної ефективності пиловловлювання, аж до нульового її значення при повному блокуванні евакуації пилу.

При тривалій роботі пиловловлювачів аспіраційних систем, внаслідок можливого порушення герметичності ущільнення між вихідним штуцером конічної частини бункера-накопичувача та штуцером пиловивантажувального пристрою, можуть виникати підсмоктування повітря іззовні, що негативно позначається на гідродинаміці та ефективності сепарації частинок пилу безпосередньо в сепараційній камері.

Результати експериментального дослідження впливу режимно-конструктивних параметрів та експлуатаційних умов бункерної частини моделі ВАЗЗПЦ, представлені на рис. 4.8 – 4.11.

При підсмоктуванні повітря іззовні, в залежності від його кількості, на рівні відбійної шайби у вивантажувальному кільцевому зазорі виникає течія повітря, направлена назустріч руху пилу. Ця течія є функцією кількості

повітря, що підсмоктується іззовні, і виконує негативну роль «запираючого» потоку», який перешкоджає вільному вивантаженню пилу з сепараційної камери у бункер-накопичувач. Рисунок 4.8 ілюструє цей ефект.

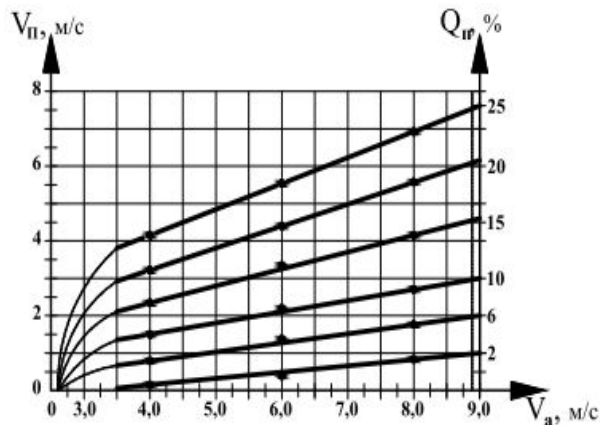


Рис. 4.8 – Залежність швидкості «запираючого» потоку (V_n) у кільцевому зазорі від середньої швидкості (V_a) і кількості повітря, що підсмоктується ззовні (Q_n).

Як видно з рис. 4.8, у всьому робочому діапазоні швидкостей в сепараційній камері, із збільшенням кількості повітря, що підсмоктується (Q_n), зростає й швидкість «запираючого» потоку, що негативно впливає на швидкість та повноту вивантаження уловленого пилу і призводить до збільшення вторинного виносу частинок пилу переважно тонкодисперсних фракцій. Експериментально визначений характер залежності загальної ефективності сепарації

пилу доломіту від кількості повітря, що підсмоктується, на моделях ВА3ЗПЦ-200 і ВА3ЗПЦ-400 (рис 4.9).

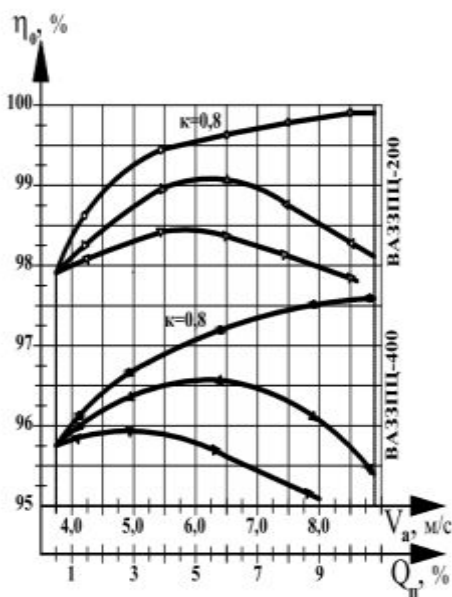


Рис. 4.9 – Залежність загальної ефективності пилоловлювання (η_o) від планової швидкості (V_a) і кількості повітря, що підсмоктується (Q_n) (пил : доломіт) :

○, ● – без підсмоктувань ззовні ; △, ▲ – з підсмоктуваннями і безперервним вивантаженням пилу; ▽, ▼ – з підсмоктуванням і без вивантаження пилу.

Експериментальні дослідження з визначення загальної ефективності сепарації проводились одночасно на двох моделях в режимі «ефективного пиловловлювання» (при кратності $K = 0,8$). Встановлено, що зростання частки потоку, що підсмоктується ($Q_{\text{п}} = f(Q_0)$), супроводжується й більшим падінням сепараційної здатності пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ. Цей висновок підтверджується також і даними експерименту на ВАЗЗПЦ-300 з уловлювання пилу меленої крейди.

На рис. 4.10 за результатами теоретичних розрахунків побудовано сімейство усереднених кривих рівня виносу частинок пилу (ε) в залежності від швидкості руху «запираючого» потоку (V_n) у кільцевому зазорі та величини розподілу частинок пилу за розмірами (σ'_n).

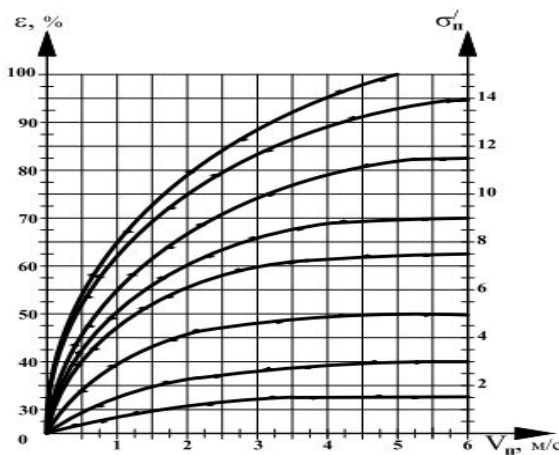


Рис. 4.10 – Залежність загальної ефективності пиловловлювання (η_0) від швидкості (V_a) і кількості повітря, що підсмоктується (Q_n)

(пил : крейда мелена) :

○ – без підсмоктування ; Δ – з підсмоктуванням і безперервним вивантаженням пилу; ∇ – з підсмоктуванням і без вивантаження пилу.

Характер побудованих кривих свідчить про те, що різниця з падіння ступеня ефективності пиловловлювання при підсмоктуванні повітря ззовні з безперервною евакуацією пилу (Δ) значно менша, ніж без його вивантаження (∇), особливо в робочому діапазоні планових швидкостей $V_a = (4,0 - 8,85) \text{ м/с}$. Із зростанням величини σ'_n , тобто при збільшенні частки дрібнодисперсних фракцій у сипкому матеріалі, зростає й виніс (ε) пилу з сепараційної камери, що обумовлюється

посиленням протидії шкідливого «запираючого» потоку вільному надходженню пилу в бункер-накопичувач.

Як видно з рис. 4.10, значне винесення дисперсної фази, що знаходиться в робочому просторі сепараційної камери, для більшості дисперсних продуктів хімічних виробництв, будівельних матеріалів та металургійної промисловості спостерігається вже при початковій швидкості «запираючого» потоку $V_n = 4$ м/с, тобто при рівні підсмоктувань починаючи з 10% від загальної продуктивності типорозміру моделі ВАЗЗПЦ з очищеного повітря.

Таким чином, можна зробити висновок, що при роботі аспіраційної установки неухильне забезпечення надійності ущільнення пиловипускного штуцера з механізмом вивантаження пилу є актуальною задачею.

4.2 Висновки до четвертого розділу

У результаті експериментальних досліджень моделей ВАЗЗПЦ встановлений характер течій потоку у вихідному патрубку в залежності від характеру гідродинаміки в сепараційній камері. Отримані залежності рівня гідравлічних втрат та питомих енерговитрат від витрати при застосуванні різних моделей розкручувачів потоків. Встановлено, що з метою забезпечення стабільності гідродинаміки моделі ВАЗЗПЦ доцільно застосовувати лише розкручувачі уліточного типу.

Отримані результати впливу геометрії бункерної частини моделі ВАЗЗПЦ на гідродинаміку та стійкість гідродинамічного режиму в сепараційній камері. Встановлено, що підсмоктування повітря іззовні через порушення ущільнення пиловипускного патрубку негативно впливає на ефективність пиловловлювання. Отримані залежності загальної ефективності

пиловловлювання та ступеня виносу від швидкості руху «запираючого» потоку у пиловипускному зазорі на рівні відбійної шайби.

Основні теоретичні положення та експериментальні дані розділу опубліковані в працях [14], [101], [120].

РОЗДІЛ 5

КОНСТРУКТОРСЬКІ РОЗРОБКИ ТА ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ ВИХРОВИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

5.1 Особливості створення промислових моделей вихрових пиловловлювачів

Особливості гідродинаміки і специфічні властивості пиловловлювача моделі ВАЗЗПЦ вимагають творчого інженерного підходу при їх конструюванні, при цьому слід дотримуватися наступних рекомендацій.

Технічна характеристика. Безумовне виконання вимог технічного завдання на проектування можливе лише при пошуку оптимального співвідношення між ефективністю пиловловлювання та гідравлічним опором. Якщо превалюючим чинником виступає загальна ефективність пиловловлювання, а енергоспоживання не регламентовані, то режимно-конструктивні параметри проектованої моделі ВАЗЗПЦ мають відповідати виключно цій умові. Інші чинники можуть враховуватися лише після виконання умов головного.

Конструктивні розміри. Співвідношення основних геометричних розмірів моделі ВАЗЗПЦ є сталими і повинні витримуватися з відповідною точністю, передбаченою кресленнями робочої документації. Не регламентовані, наприклад діаметр пиловипускного отвору, конусність бункерної частини, товщина стінки сепараційної камери, бункера-накопичувача, вибираються в залежності від характеристик і специфічних особливостей пилу та міцнісних розрахунків. При цьому слід прагнути до мінімізації габаритних розмірів : менший діаметр сепараційної камери відповідає більш високій ефективності сепарації, але при цьому необхідно співвідносити розміри прохідних каналів з відповідними властивостями твердої фази.

При великій продуктивності з очищеного повітря слід дотримуватись правила : чим менша кількість одиночних елементів, здатних забезпечити проектні показники, тим більш надійною буде їх робота у досягненні визначних показників ефективності роботи. В разі значної кількості одиночних елементів, особливо при батарейній їх компоновці, завжди присутня вірогідність перетоків повітря між суміжними елементами, що може призвести до погіршення ефективності роботи системи в цілому. При необхідності уловлювання пилу з підвищеними адгезійно-когезійними властивостями недоцільно закладати мультіелементи найменшого типорозміру внаслідок потенційної загрози забивання пиловим матеріалом прохідних каналів завихривачів потоків при зниженні загальної витрати повітря нижче номінальної.

Режим роботи. Номінальний режим протягом тривалого часу роботи аспіраційної системи практично не впливає на її конструктивне оформлення в цілому або її окремі елементи. Але при цьому слід передбачати можливість проведення відповідних операцій з контролю, технічного обслуговування та ремонту без зупинки аспіраційної системи.

Періодичний чи безперервний режим вивантаження уловленого пилу з бункерів-накопичувачів лише частково впливають на їх конструкцію. При технологічній потребі у накопиченні певної кількості сипкого матеріалу, розміри бункера можуть бути збільшеними до потрібної місткості. При безперервному вивантаженні – зменшеними до мінімуму, а при груповій чи батарейній компоновці одиночних пиловловлювачів, бункер на кожному з них може бути відсутнім, але при умові наявності загального бункера-накопичувача відповідної місткості та конфігурації.

Особливі вимоги Замовника. Замовник знепилюючої аспіраційної установки може пред'являти свої специфічні умови чи мати певні побажання, наприклад стосовно параметрів її функціонування, експлуатації та обслуговування, компоновки або габаритних розмірів. Тому Розробник по

можливості мусить їх враховувати лише тоді, коли визначні проектні параметри виконані.

5.2 Загальна методика вибору і розрахунку циліндричних вихрових пиловловлювачів

Інженерна методика вибору і розрахунку вихрових пиловловлювачів розроблена на підставі джерела [34], а також результатів власних теоретичних досліджень і експериментальних (лабораторних, дослідно-промислових і промислових) випробувань. Вона розповсюджується виключно на типову модель ВАЗЗПЦ та модель з гвинтовою сепараційною камерою [148] і має єдиний методологічний підхід з методами проектування, вибору і розрахунку циклонів [11].

Методика дозволяє на всіх стадіях проектування визначати номінальний рівень та допустимі границі розкиду основних режимних параметрів, а також конструктивні розміри пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ, здатних забезпечувати проектні показники.

Алгоритм вибору і розрахунку режимно-конструктивних параметрів вихрових пиловловлювачів [34], створюваних на базі моделі ВАЗЗПЦ, показаний на рис. 5.1.

В опитувальному листі або в технічному завданні на проектування пиловловлюючих установок приводиться насамперед загальна витрата повітря Q_0 , що підлягає очищенню, надаються гранулометричний (фракційний) склад пилу (або медіана розподілу d_{50} , *мкм*) і щільність його матеріалу (ρ_n , *кг/м³*), рівень вхідної запиленості повітря ($Z_{вх}$, *г/м³*) і робоча температура носія (*t*, °C). Крім того, вказуються необхідний ступінь очищення (η , %) і гранично допустима величина гідравлічних втрат (ΔP , *Па*), а також інші технологічні відомості, які необхідно враховувати при розробці нової чи реконструкції існуючої аспіраційної системи.

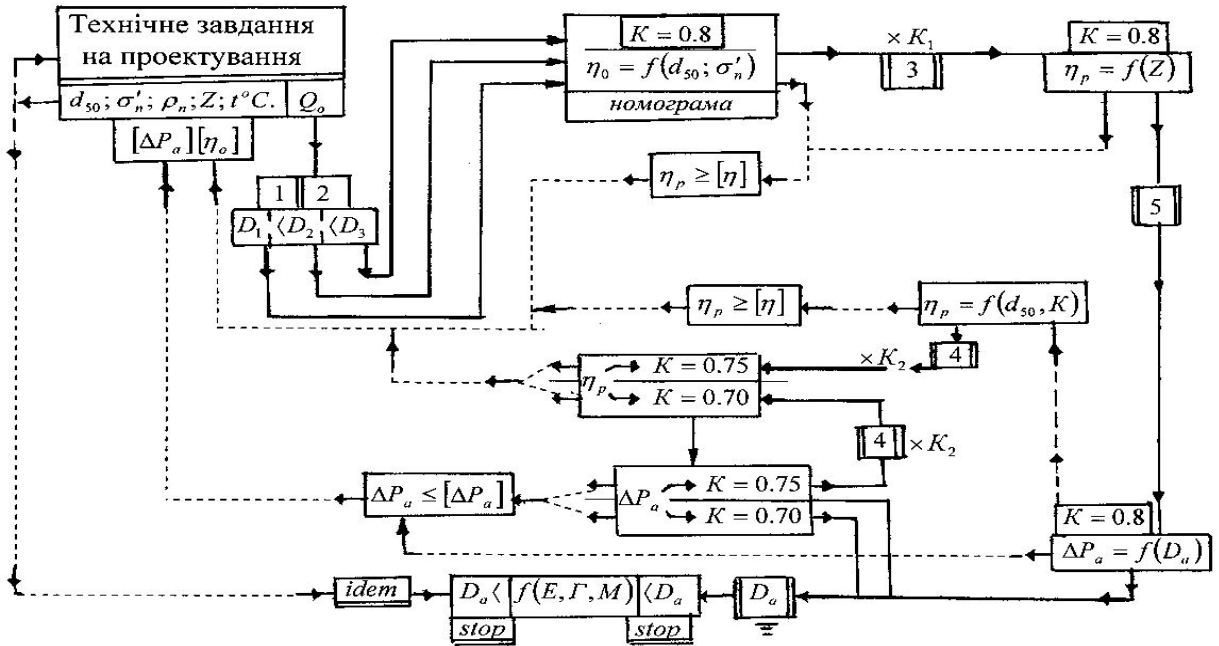
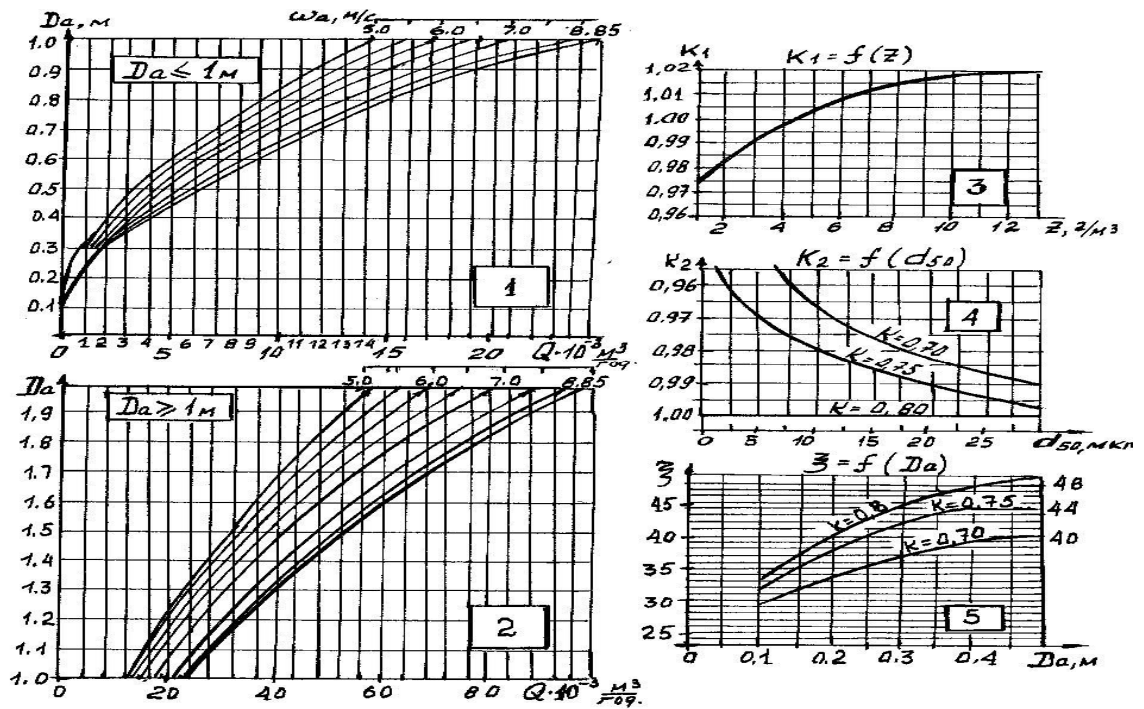


Рис. 5.1 – Алгоритм розрахунку пиловловлювача моделі ВА33ПЦ

Визначення номінального діаметра. Виходячи із заданої продуктивності, по діаграмам 1 та 2 [34], (рис. 5.2) визначається необхідний діаметр сепараційної камери апарата (D_a).



1,2 – $D_a = f(Q_o)$; 3 – $K_1 = f(z)$; 4 – $K_2 = f(z)$; 5 – $\xi = f(D_a)$.

Рис. 5.2 – Графічні залежності до рис. 5.1

Слід урахувати, що ВАЗЗПЦ може ефективно працювати в широкому діапазоні перепускної здатності, тому проектоване навантаження з аерозолію зможуть забезпечити, як правило, два, а при значних витратах (понад 30 тис. $\text{м}^3/\text{год}$) – три й більше типорозмірів, причому мінімальна умовна швидкість, віднесена до поперечного перерізу сепараційної камери апарата W_a , з урахуванням прийнятого для прийнятого рівня гідравлічного опору, приймається на рівні (4,5...5) м/с, а максимальна – 8,85 м/с. Тому при визначенні номінального діаметра сепараційної камери апарата слід в подальших розрахунках урахувати весь діапазон типорозмірів, що можуть забезпечити необхідну перепускную здатність з очищуваного повітря.

Номінальний діаметр ВАЗЗПЦ визначається у такий спосіб.

Спочатку визначається діапазон діаметрів ВАЗЗПЦ, що відповідають проектній продуктивності з повітря при граничних значеннях планових швидкостей :

$$D_a = \left(\frac{Q}{0,785 \cdot V_a} \right)^{-0,5}, \text{ м}, \quad (5.1)$$

де $V_a = (5-8,85)$ м/с – діапазон робочих швидкостей, віднесених до поперечного перерізу сепараційної камери ВАЗЗПЦ ;

Q – номінальна витрата очищуваного повітря, $\text{м}^3/\text{с}$;

D_a – діаметр сепараційної камери, м.

Отримані проміжні значення діаметрів D_a в мм округляються і у подальших розрахунках приймаються розміри з типорозмірного ряду :

0,1; 0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,50; 0,60; 0,75; 0,90; 1,00; 1,20; 1,50; 1,80; 2,00.

Винятково допускається призначати й проміжні значення розмірів.

Розрахунок загального коефіцієнта очищення. Для заданих вихідних умов, користуючись номограмою [34], показаною на рис. 5.3, для кожного з попередньо обраних діаметрів визначається загальна ступінь очищення.

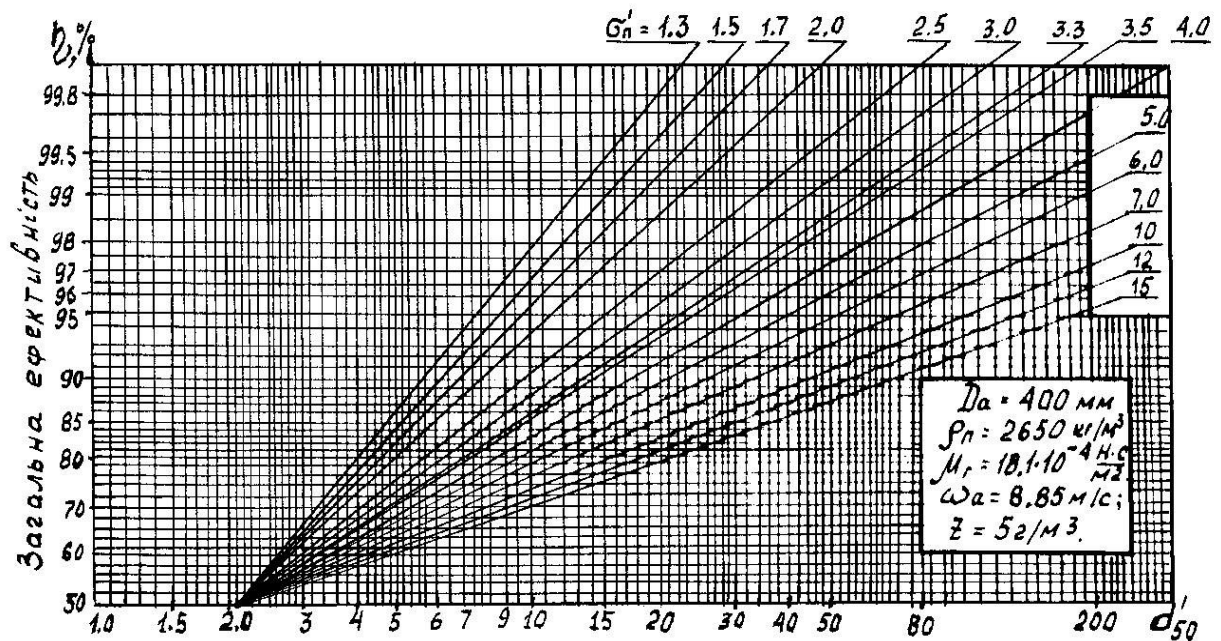


Рис. 5.3 – Номограма з визначення загальної ефективності пиловловлювання $\eta=f(d_{50})$

Номограма пов'язує загальну ефективність пиловловлювання з медіанним діаметром частинок пилу d_{50} і параметром їх розподілу $\sigma'_{п}$. Номограма побудована для розрахунку пиловловлювачів виключно моделі ВАЗЗПЦ, що працюють у одних експлуатаційних умовах. Для оцінки загального ступеня пиловловлювання у проектованому апараті проводиться перерахунок медіани розподілу частинок уловлюваного пилу

$$d'_{50} = d_{50} / K' \cdot 10^3 \sqrt{\frac{D_a \cdot \mu_{\Gamma}}{V_a \cdot \rho_{\Pi}}}, \text{ мкм}, \quad (5.2)$$

де d_{50} – медіана розподілу частинок пилу, що підлягає осадженню, мкм;

μ_{Γ} – в'язкість повітря (газу) в робочих умовах, $\text{Н} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-2}$;

ρ_{Π} – щільність матеріалу пилу, що піддається осадженню, $\text{кг} / \text{м}^3$;

$K' = 56,41$ – коефіцієнт типової моделі ВАЗЗПЦ ;

$K' = 55,27$ – коефіцієнт моделі ВАЗЗПЦ (з гвинтовою сепараційною камерою та неперервним вивантаженням пилу [148]).

Визначивши значення d'_{50} і відклавши його на осі абсцис, на перетині вертикалі із значенням параметру $\sigma'_{п}$, на осі ординат знаходять величину

загальної ефективності уловлювання для даного типорозміра ВАЗЗПЦ. При цьому слід враховувати, що отримане значення η_p відповідає кратності співвідношення потоків по каналах, що дорівнює $K = 0,8$.

Далі отриманий коефіцієнт очищення η_p порівнюється із заданим (η). Якщо умова $\eta_p \geq [\eta]$ виконується, то по графіку 3 (рис. 5.2) або по рівнянню $K_1 = 0,97 \cdot z^{0,02}$ [34] (при концентрації пилу в межах $\bar{z}_{Вх} = (1...25) \text{ г/м}^3$) визначається поправочний коефіцієнт K_1 , який частково враховує певний вплив запиленості потоку (\bar{z}) на загальну ефективність уловлювання. Після помноження η_p на поправочний коефіцієнт K_1 , отримане значення порівнюється з проектним $[\eta]$. Якщо умова $\eta'_p = \eta_p \cdot K_1 \geq [\eta]$ виконується, то далі розраховуються гідравлічні втрати (ΔP_a).

При необхідності встановлення оціночного рівня фракційного коефіцієнта η_ϕ сепарації в проектуваному пиловловлювачі, слід скористатися номограмою [34], що показана на рис. 5.4.

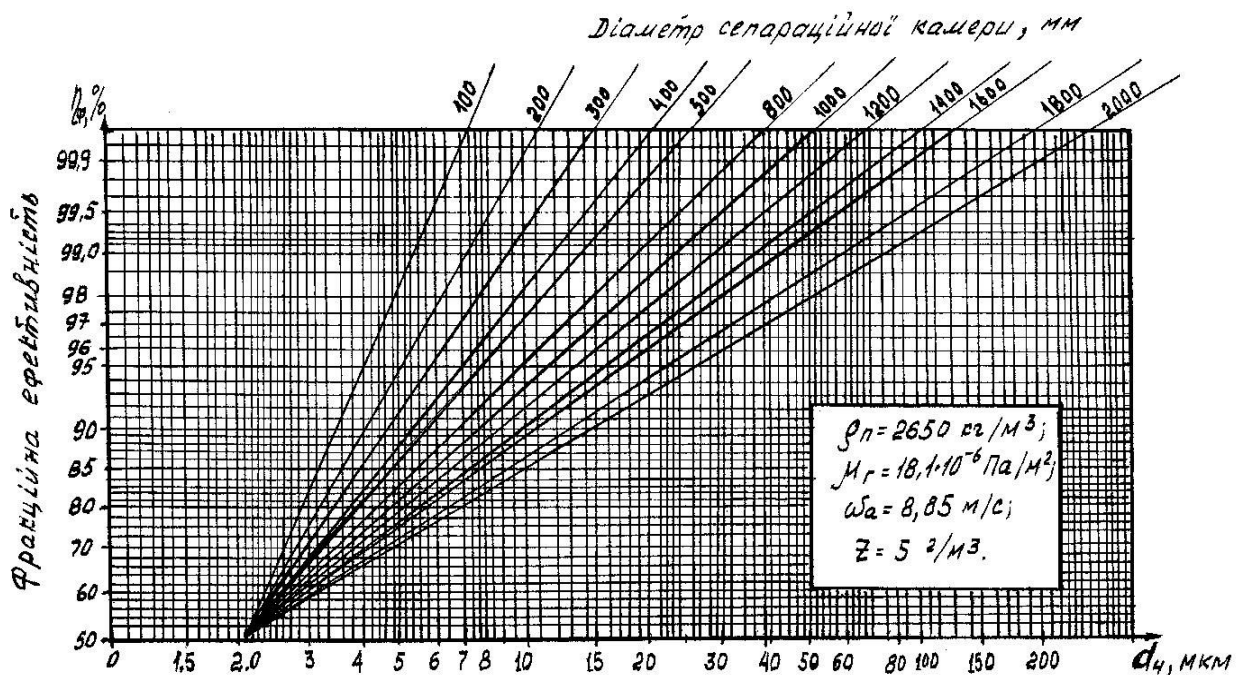


Рис. 5.4 – Номограма для визначення фракційної ефективності ВАЗЗПЦ

$$\eta_\phi = f(d_u, D_a)$$

Щоб визначити фракційну ефективність уловлювання частинки пилу умовним діаметром d_u в конкретному типорозмірі апарата ВАЗЗПЦ в

робочих умовах, на осі абсцис слід відкласти перераховане по формулі (5.3) значення d'_n , знайти точку його перетину з відповідною нахиленою прямою, що позначає діаметр сепараційної камери від 0,1 до 2,0 м, а на осі ординат отримати шукану величину. При цьому слід враховувати, що отримане значення η_ϕ відповідатиме ефективності, визначеній при кратності потоків $K = 0,8$ і концентрації пилу не вище 5 г/м^3 .

$$d'_q = d_q / K' \cdot 10^3 \sqrt{\frac{D_a \cdot \mu_\Gamma}{V_a \cdot \rho_\Pi}}, \text{ мкм}, \quad (5.3)$$

де d_q – діаметр частинки пилу, що підлягає уловлюванню, мкм;

μ_Γ – в'язкість повітря (газу) в робочих умовах, $\text{Н}\cdot\text{с}\cdot\text{м}^{-2}$;

ρ_Π – щільність матеріалу пилу, що піддається уловлюванню, кг/м^3 ;

$K' = 56,41$ – середній коефіцієнт типової моделі ВАЗЗПЦ.

$K' = 55,27$ – коефіцієнт моделі ВАЗЗПЦ (з гвинтовою сепараційною камерою та неперервним вивантаженням пилу [148]).

Розрахунок гідравлічних втрат. Гідравлічні втрати тиску є одним з визначальних параметрів їхньої ефективності роботи. Знання гідравлічного опору необхідно насамперед при виборі вентиляторів чи газодувок, при попередній оцінці рівня питомих енерговитрат, при конструктивному оформленні окремих функціональних елементів пиловловлюючої апаратури.

В загальному випадку гідравлічні втрати моделі ВАЗЗПЦ можна визначити по формулі :

$$\Delta P = \xi_a \frac{\rho_\Gamma^{t^0} \cdot V_a^2}{2}, \text{ Па}, \quad (5.4)$$

де ξ_a – коефіцієнт гідравлічного опору моделі апарата, який визначають по графіку 5 (рис. 5.2);

V_a – середня планова швидкість потоку в сепараційній камері, м/с;

$\rho_\Gamma^{t^0}$ – щільність повітря (газу) в робочих умовах, кг/м^3 .

Потужність (N), що витрачається на очищення 1000 м^3 заповненого повітря, яка характеризує рівень експлуатаційної економічності установки, може бути визначена по формулі :

$$N = \frac{\Delta P_a \cdot L \cdot k}{3600 \eta_e \eta_{пер}} \text{ кВт}, \quad (5.5)$$

де L – витрата повітря, $\text{м}^3/\text{г}$; k – коефіцієнт запасу електродвигуна вентилятора; $\eta_e, \eta_{пер}$ – відповідно к.к.д. вентилятора та передачі від електродвигуна до колеса вентилятора.

Середня швидкість потоку в сепараційній камері ВАЗЗПЦ розраховується виходячи з потрібної продуктивності з повітря, або береться із графіків 1 і 2 (рис. 5.2) на перетині значень Q і D_a (лінії рівних середніх швидкостей). Отримане у такий спосіб розрахункове значення гідравлічного опору ΔP_a надалі порівнюється з допустимим рівнем опору $[\Delta P]$. Якщо умова $\Delta P_a \leq [\Delta P]$ виконується, то для подальшого проектування приймається даний діаметр апарата.

Варто зазначити, що при розрахунках може мати місце і такий випадок, коли умові технічного завдання з гідравлічних втрат задовольняють два та більше типорозмірів моделі ВАЗЗПЦ. У цьому випадку критеріями для порівняльної оцінки альтернативних варіантів можуть служити, наприклад, питомі енерговитрати (E), габаритні розміри (G) та металоємність (M) проєктованого пиловловлювача. Вибір того чи іншого критерію порівняння залежить від того, який з них на думку проєктувальника є визначальним для конкретних умов експлуатації.

Якщо виявиться, що розрахункові втрати перебільшують допустимі, тобто має місце нерівність $\Delta P_a > [\Delta P]$, то у цьому разі необхідно зробити повторний перерахунок показників роботи ВАЗЗПЦ при частково зниженому значенні кратності потоків, наприклад в межах $K = (0,79-0,75)$.

Експериментально встановлено, що зі зменшенням величини кратності потоків спостерігається і відповідне зниження як загальної ефективності

пиловловлювання, так і гідравлічного опору ΔP_a . Таким чином, зміною кратності потоків по каналах ВАЗЗПЦ можна досягти відповідного номінального співвідношення між величинами η_p і ΔP_a . Приймаючи, наприклад, $K = 0,75$, насамперед необхідно уточнити розрахункове значення η_p , для чого слід помножити значення комплексу $(\eta_p \cdot K_1)$, отримане при кратності $K = 0,80$, на поправочний коефіцієнт K_2 , який знаходять по графіку 4 (рис. 5.2), або по виразу

$$K_2 = 0,949 \cdot d_{50}^{0,018} \quad (\text{при } \bar{z}_{\text{Вх}} = (1 \dots 25) \text{ г/м}^3) \quad (5.6)$$

Порівнюючи величину η_p' , отриману при $K=0,75$ з $[\eta]$, перевіряють виконання наступної умови $\eta_p' \geq [\eta]$. Якщо вона виконується, то подальшому проектуванню цілком відповідає даний типорозмір ВАЗЗПЦ. Якщо ж розрахункові гідравлічні втрати й при цьому значно перевищують гранично допустимі, то слід здійснити повторний перерахунок всіх параметрів роботи апарата у такий же спосіб, що наведений раніше, але вже при новому значенні кратності, наприклад при $K=0,70$. При цьому поправочний коефіцієнт K_2 визначається по виразу

$$K_2 = 0,940 \cdot d_{50}^{0,021} - 0,022. \quad (5.7)$$

Вибір номінального типорозміра. При розробці ВАЗЗПЦ при включенні його в технологічну схему конкретного виробництва можливі два варіанти:

- 1 – апарат призначений для знов проектованої схеми;
- 2 – апарат призначений для заміщення існуючого пиловловлювача, наприклад циклона, який за одним чи декількома визначними параметрами не відповідає новим умовам експлуатації.

В обох випадках доцільно брати до уваги конкретні умови експлуатації і місце установки проектованого апарата. Наприклад, якщо апарат призначений для установки на існуючому проммайданчику, часто в досить стиснутих умовах існуючого обладнання, то при визначенні компоновання вирішальними факторами, що впливають на конструкцію пилоуловлювача, повинні бути прийняті до уваги габаритні розміри та гідравлічні втрати.

У тому випадку, коли проєктований пиловловлювач ВАЗЗПЦ входить в якості структурної одиниці у нову технологічну схему, варто прагнути врахувати такі фактори, як загальна ефективність пиловловлювання, енергетична ефективність, вартість виготовлення (B), металомісткість (M) та габаритні розміри (L).

Таким чином, при виборі оптимального типорозміру ВАЗЗПЦ в сполученні з номінальними режимними параметрами якість вибору найбільш прийняттого варіанту в остаточному підсумку залежить від досвіду конструктора, який несе певну міру відповідальності за прийняття остаточного рішення.

Застосовуючи розглянуту вище методику можна визначити найбільш прийнятний для конкретних експлуатаційних умов типорозмір ВАЗЗПЦ з номінальними режимно–конструктивними параметрами. При цьому цілком враховуються не тільки відповідність експлуатаційним вимогам обраного пиловловлювача, але й його основні техніко-економічні показники.

5.3 Основні напрямки конструктивної модернізації вихрових пиловловлювачів

Конструктивний розвиток будь-яких складних технічних систем, в тому числі і технологічної апаратури природоохоронного призначення, може йти лише шляхом інтенсифікації і підвищення ефективності тих процесів, що в них реалізуються [146].

З метою поліпшення режимно-конструктивних параметрів та ефективності роботи пиловловлювачів моделі ВАЗЗПЦ їх конструктивне удосконалення може відбуватися як усуненням окремих недоліків, так і шляхом конструктивних змін окремих функціональних систем чи окремих елементів [147–149].

Поширений аналіз найбільш впливових зон для інноваційних конструктивних удосконалень визначних елементів, результати їх експериментальної перевірки та рекомендації наведені в роботі [147].

На рис. 5.5 визначені найбільш впливові функціональні зони, які можливо піддавати конструктивній модернізації без погіршення стійкості гідродинаміки та ефективності роботи моделі ВАЗЗПЦ.

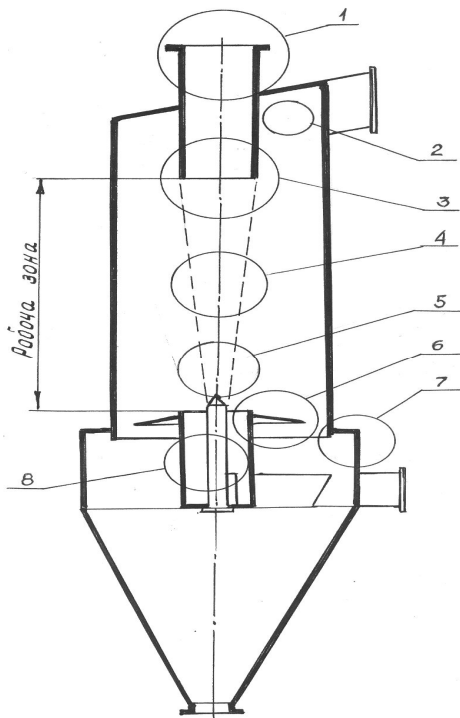


Рис. 5.5 – Зони конструктивної модернізації ВАЗЗПЦ :

- 1 – верх вихідного патрубка ;
- 2 – вторинний завихрувач ;
- 3 – низ вихідного патрубка ;
- 4 – робоча зона ;
- 5 – центральний витіснювач ;
- 6 – шайба відбійна ;
- 7 – бункер-накопичувач пилу ;
- 8 – завихритель первинного потоку.

При розробці ВАЗЗПЦ для конкретного використання вказані зони можуть бути відповідним чином конструктивно реконструйовані з метою досягнення більш ефективних показників функціональності та адаптованості до конкретних умов експлуатації.

Сепараційна камера. Сепараційна камера є визначальним функціональним елементом, в якому власне й здійснюється процес сепарації твердих частинок з системи закручених потоків. Її геометрія однозначно визначена моделлю і не може довільно змінюватися. Але всередині її певним чином можуть розміщуватися окремі функціональні елементи, призначені для поліпшення умов взаємодії фаз без порушення характеру і стійкості утвореного гідродинамічного режиму. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень була розроблена інноваційна конструкція

пиловловлювача моделі ВАЗЗПЦ з безперервним вивантаженням пилу [148], яка запатентована, пройшла промислову апробацію і відрізняється від типової моделі ВАЗЗПЦ більш високими техніко-економічними показниками. Схематично нова конструкція показана на рис. 5.6.

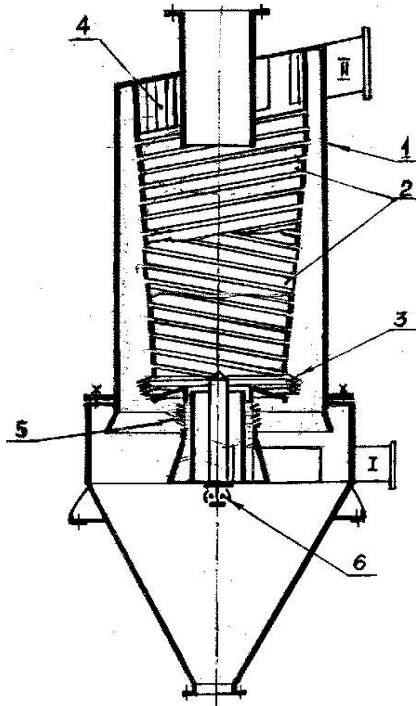


Рис. 5.6 – Схема інноваційної конструкції ВАЗЗПЦ з гвинтовою сепараційною камерою і неперервним вивантаженням пилу

Суттєвою відзнакою нової моделі пиловловлювача у порівнянні з типовою моделлю є те, що всередині циліндричного корпусу розміщена гвинтова сепараційна камера 1, що внизу закінчується жалюзійним розвантажувачем 3, пов'язаним з завихрувачем первинного потоку (I), в якому завдяки ексцентрично встановленому витискувачу та шарніру 6 утворюється вібрація, що передається на сепараційну камеру. Крім того, у первинному завихрувачі (I) передбачений горизонтальний 5, а у вторинному (II) вертикальний жалюзійний розвантажувач пилу 4.

Інші істотні відмінності містяться в тому, що кут нахилу до горизонту спіралі стрічки, з якої виготовлена сепараційна камера, знаходиться в межах від 10^0 до 30^0 , міжвитковий зазор складає (20–25)% від ширини стрічки, а відбійна шайба відокремлена від циліндричного елемента завихрителя первинного потоку і вгорі жорстко пов'язана через кінцевий жалюзійний розвантажувач з нижнім кінцем сепараційної камери, а знизу – з пружним жалюзійним розвантажувачем первинного потоку.

Слід зауважити, що розміщення в приосьовій зоні сепараційної камери будь-яких елементів не завжди приводить до позитивних результатів [147].

Завихрувачі потоків. Завихрувачі первинного і вторинного потоків, що піддані реконструкції згідно [148], мають конструктивне оформлення, яке показано на рис. 5.7, 5.8.

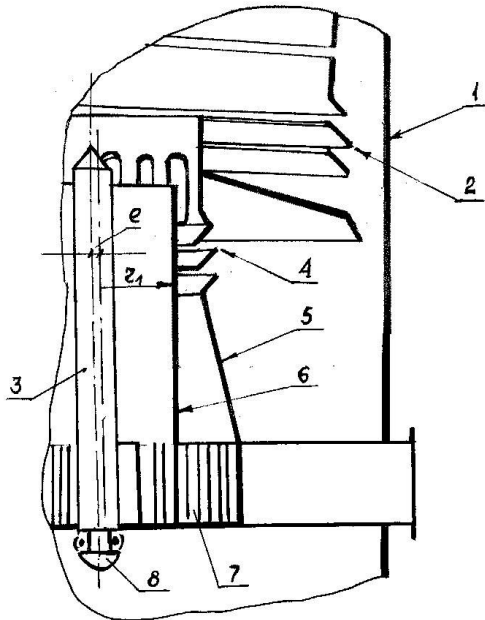


Рис. 5.7 – Конструктивне оформлення первинного завихрителя :

1 – корпус; 2 – жалюзійний розвантажувач сепараційної камери; 3 – осьовий витиснювач; 4 – жалюзійний розвантажувач первинного завихрувача; 5 – конфузор; 6 – циліндр ; 7 – вертикальні жалюзі; 8 – шарнір.

В циліндричному корпусі 1 нижче рівня жалюзійного розвантажувача сепараційної камери 2 розміщені ексцентрично встановлений осьовий витиснювач 3, нижня частина якого виконана у вигляді шарніру 8, жалюзійний розвантажувач первинного завихрувача 4, пов'язаний з конфузором 5, а також вертикальні жалюзі 7, що забезпечують сполучення циліндра 6 з порожниною конфузора 5.

Відділений від повітря вже на перших витках, пил через вертикальні жалюзі 7 з циліндра 6 через конфузор 5 та горизонтальні щілини розвантажувача 4 попадає в порожнину бункера безпосередньо під відбійною шайбою, у той час як пил з сепараційної камери через щілини розвантажувача 2 вільно зсипається в бункер через кільцевий зазор між відбійною шайбою та стінкою циліндричного корпусу 1.

Ексцентрична установка осьового витиснювача 3 відносно осі циліндра 6 при проходженні через нього аерозолі викликає досить мілку вібрацію, яка передається через первинний завихрувач на сепараційну камеру і попереджає налипання пилу на поверхні її конструктивних елементів.

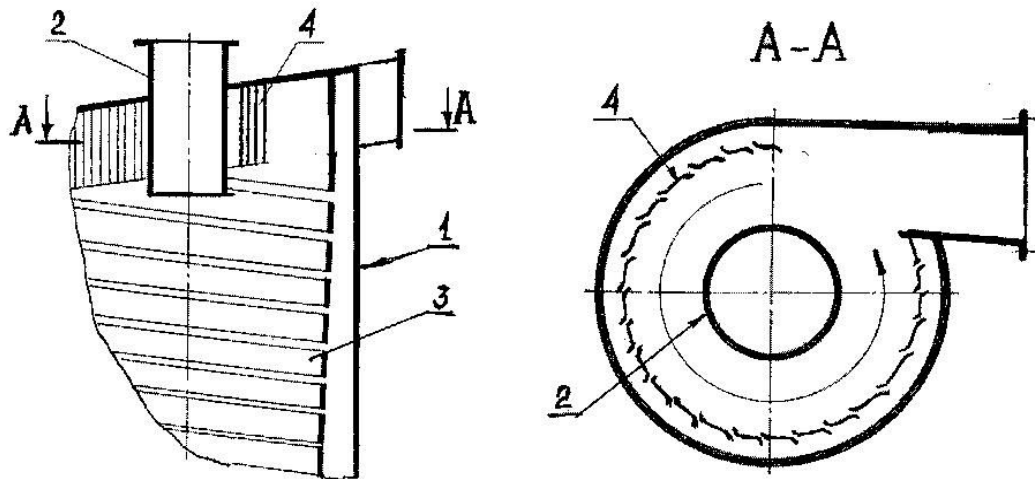


Рис. 5.8 – Конструктивне оформлення вторинного завихрителя :

1 – корпус; 2 – вихідний патрубок; 3 – конічна гвинтова сепараційна камера; 4 – жалюзійний розвантажувач.

Попереднє розвантаження пилу з вторинного завихрувача забезпечується вертикальними щілинами жалюзі розвантажувача 4, який вгорі переходить безпосередньо у гвинтову сепараційну камеру 3.

Таким чином, попереднє вивантаження частинок пилу з завихрувачів, які вже на перших витках відділяються від запиленого повітря, сприяє зменшенню концентрації пилу в сепараційній камері.

Вихідний патрубок. Вихідний патрубок ВАЗЗПЦ є визначальним елементом, в якому продовжуються процеси, що протікають в сепараційній камері.

Дослідження впливу різних по конструкції розкручуючих пристроїв на стабільність гідродинаміки і ефективність роботи ВАЗЗПЦ більш ґрунтовно викладені в роботі [120]. За результатами теоретичних досліджень [137] та експериментальних випробувань було запропоновано доочищувати потік, що відводиться через вихідний патрубок і містить певну кількість остаточного пилу, з використанням спеціального контактного модуля (КМ) мокрого очищення, конструкція якого детально описана в патенті [149].

КМ пропонується встановлювати безпосередньо на вихідному патрубку, використовуючи утворений в ньому гідродинамічний режим.

Схематично варіант конструктивного оформлення КМ мокрого очищення показаний на рис. 5.9.

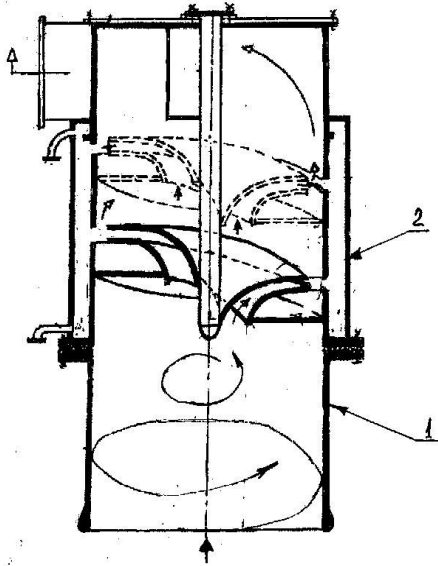


Рис. 5.9 – Варіант конструкції контактної камери :

- 1 – вихідний патрубок ;
- 2 – контактний модуль.

Контактний модуль мокрого очищення 2 встановлюється і закріплюється на вихідному патрубку 1, з якого запилений потік у вигляді двох вихорів – зовнішнього і внутрішнього – надходить у контактні ступені, де частинки пилу набувають обертального руху і контактують з вільно стікаючою по стінці плівкою рідини. Модуль влаштований таким чином, що забезпечує неперервне поновлення поверхні рідини та її відведення. Суттєва відзнака нової моделі КМ міститься в наданні частинкам пилу обертального

руху навкруги власної осі, що сприяє подоланню нею пограничного шару рідини із значно меншою енергією входження.

Пилозбірний бункер. Пилозбірний бункер для пиловловлювача моделі ВАЗЗПЦ є елементом, в якому розміщується первинний завихрувач, а конічна його частина виконує роль буфера, в якому збирається частка уловленої пилу і забезпечує пиловий затвор між сепараційною камерою та вивантажувальним механізмом.

Вплив пилозбірного бункера на ефективність роботи ВАЗЗПЦ може проявитися тільки у випадку виникнення підсмоктувань повітря через нещільності фланцевого з'єднання вивантажувального штуцера з механізмом видалення пилу.

5.4 Напрямки поліфункціонального застосування вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками

Інноваційні конструкції високоефективного технологічного обладнання поліфункціонального призначення можуть з'являтися як за результатами нових наукових даних щодо конкретних технологічних процесів, так і в результаті конструкційної адаптації відомих моделей апаратів до умов процесів, які підлягають реалізації. Відомо, що принципово нові конструкції технологічної апаратури створюються методами, що базуються на відомих принципах пошуку нових технічних рішень.

На відміну від гідродинаміки однопоточних циклонів, які використовуються виключно для сухого чи мокрого очищення заповнених потоків, то в багатопоточних системах закручених потоків існують умови для управління активною гідродинамікою в досить широких межах її режимних параметрів, що дає можливість проводити деякі технологічні процеси.

Концепції багатофункціональних вихрових апаратів, що розробляються для будь-яких технологічних процесів, базуються на даних, до складу яких входять такі визначні параметри технологічного процесу як продуктивність, швидкості повітряних (газових) і матеріальних потоків, необхідний час перебування оброблюваного матеріалу в робочій зоні.

Активна гідродинаміка в системах зустрічно направлених закручених потоків, утворювана в моделі ВАЗЗПЦ, окрім відцентрового очищення заповнених потоків, дозволяє розширити галузь його використання. Використання апаратів з АГР на виробництві може бути для нього економічно вигідним.

Так, після відповідної реконструкції модель ВАЗЗПЦ може стати придатною для проведення наступних процесів :

– сушіння високовологих сипких дисперсних матеріалів (порошків, гранул тощо) та таких, що важко піддаються сушінню ;

- сушіння на інертних тілах паст и концентрованих суспензій ;
- абсорбції і адсорбції ;
- мокрого очищення газів (скрубрування у плівковому чи пінному режимах, на інертних тілах і т.і.) ;
- приготування розчинів ;
- змішування в гомо- і гетерофазних системах ;
- класифікації (фракціонування) полідисперсних матеріалів ;
- зволоження і кондиціювання повітря ;
- грануляції тонкодисперсних матеріалів: органічних барвників, пігментів, мінеральних добрив, харчових продуктів, фармацевтичних препаратів) ;
- подрібнення матеріалів стиранням ;
- шліфування отворів і поверхонь у важкодоступних місцях ;
- процесів високотемпературної (плазмохімічної) обробки полідисперсних систем.

Так, наприклад, в процесах відновлення розплавів за допомогою вуглецевих частинок, використання нового способу взаємодії фаз дозволить інтенсифікувати пірометалургійний процес за рахунок більш ефективного «впровадження» твердої фази в вільно стікаючу плівку розплаву. Відомі також процеси, що вимагають точного дозування тонкодисперсних матеріалів в рідку фазу, наприклад в процесах синтезу напівпродуктів і барвників, при суспендуванні, розчиненні, змішуванні, впровадженні сипких матеріалів у високов'язкі рідкі композиції - високомолекулярні сполучення (карбамідно-формальдегідні смоли, латекси, мастила) - при їх фарбуванні, введенні відносно невеликих за обсягом добавок (стабілізаторів, пластифікаторів, твердофазних диспергаторів, прискорювачів твердіння смол, антиоксидантів, різного рода поверхнево-активних речовин (ПАР), трасерів та інших компонентів) в рідину. Вказані процеси можуть проводитися в модернізованій та адаптованій моделі ВАЗЗПЦ.

Перспективним застосуванням нового способу взаємодії фаз є процеси змішування певних речовин, що знаходяться в різному агрегатному стані. Так, відомі процеси змішування спеціально підготовлених рідкофазних систем, одна з яких попередньо переводиться у твердофазний стан, наприклад, шляхом заморожування. При цьому дисперсна тверда фаза попередньо і в необхідному співвідношенні рівномірно розподіляється в рідині з наступним криогенним впливом на утворювану у такий спосіб систему. Використання конструкції контактного модуля по патенту [149] для такого процесу може бути ефективним і економічно вигідним.

При конструюванні технологічної апаратури відмінного від пиловловлювання призначення необхідно, насамперед, чітко визначитись з особливостями та фізичною сутністю самого процесу, що планується проводити. Далі, змінюючи окремі елементи конструкції моделі ВАЗЗПЦ, або доповнюючи її певними функціональними виробами, створюють таку конструкцію апарата, гідродинаміка якого в максимальній мірі відповідає б характеру процесу.

В загальному випадку конструктивне переобладнання типової моделі ВАЗЗПЦ для реалізації різних технологічних процесів може здійснюватися шляхом наприклад модульного конструювання, що сприятиме підвищенню рівня стандартизації і уніфікації типових елементів.

5.5 Висновки до п'ятого розділу

Розглянута інноваційна конструкція пиловловлювача моделі ВАЗЗПЦ з безперервним вивантаженням пилу, яка запатентована [148], пройшла промислове випробування і відрізняється від типової моделі ВАЗЗПЦ більш високими техніко-економічними показниками, зокрема з загальної ефективності пиловловлювання.

Розроблена інженерна методика вибору і розрахунку пиловловлювачів, створюваних на базі моделі ВАЗЗПЦ, яка дозволяє на стадії проектування визначати основні режимні і конструктивні параметри, які відповідають проектним експлуатаційним умовам.

Визначені потенційні напрямки поліфункціонального використання ВАЗЗПЦ за рахунок конструктивної адаптації певних елементів до особливостей процесів, для проведення яких планується модель ВАЗЗПЦ.

Основні результати експериментальних досліджень та теоретичних викладок розділу опубліковані в працях [102], [130], [137], [144], [147], [148], [149].

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Вперше досліджено вплив вихідних пристроїв на гідродинаміку та ефективність роботи вихрових апаратів із зустрічними закрученими потоками з циліндричною сепараційною камерою та безперервним вивантаженням пилу.

2. Показано, що аеродинамічні процеси, які відбуваються у вихідному патрубку, впливають на ефективність роботи вихрового пиловловлювача і його гідравлічний опір .

3. Визначені характерні режими течії у проточній частині вихідного патрубка в залежності від ступеня закрученості повітряного потоку.

4. Встановлено, що на загальну ефективність пиловловлювання вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою впливають параметри бункерної частини та надійність ущільнення вивантажувального патрубка пилу.

5. Розроблена математична модель розрахунку полей швидкостей в робочій зоні циліндричного вихрового пиловловлювача, заснована на збереженні моменту кількості руху, що дозволяє з достатньою для технічних цілей оцінювати величини складових швидкості у будь-якій точці сепараційного простору.

6. Розроблена уточнена математична модель гідродинаміки ВАЗЗПЦ, отримані аналітичні вирази з розрахунку мінімального діаметра частинок пилу, що характеризують фракційну ефективність уловлювання.

7. Розроблена інженерна методика вибору і розрахунку вихрових пиловловлювачів з циліндричною сепараційною камерою як складових аспіраційних систем, яка дозволяє на стадії проектування наблизити визначні параметри установок до експлуатаційних.

8. Визначені основні зони для конструктивної модернізації основних функціональних вузлів вихрових апаратів з циліндричною сепараційною камерою з метою поліпшення їхніх визначних параметрів роботи.

9. Встановлені потенційні області для поліфункціонального використання моделі ВАЗЗПЦ в якості технологічної апаратури з АГР для проведення відмінних від пиловловлювання процесів хімічної технології. Показано, що способом конструктивної модернізації ВАЗЗПЦ можлива їх адаптація для конкретного функціонального застосування.

10. Розроблена і запатентована інноваційна модель вихрового пиловловлювача з гвинтовою сепараційною камерою і вузлами попереднього безперервного вивантаження пилу.

11. Розроблено і запатентовано конструкцію контактного модуля мокрого очищення, що встановлюється безпосередньо на вихідному патрубку ВАЗЗПЦ і дозволяє підвищити рівень загальної і фракційної ефективності пиловловлювання.

12. Впроваджені і пройшли промислово апробацію як типові моделі ВАЗЗПЦ, так і інноваційні моделі, при реконструкції аспіраційних установок на ТОВ «Науково-виробниче об'єднання «Севєродонецький Склопластик», ТОВ «Науково-виробнича фірма «МІКРОХІМ» та ТОВ «Рубіжне–Агро».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лукин, В. Д. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности [Текст] / В. Д. Лукин, М. И. Курочкина. – Л. : Химия, 1980. – 232 с.
2. Коузов, П. А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности [Текст] / П. А. Коузов, А. Д. Мальгин, Г. М. Скрябин. – Л. : Химия, 1982. – 256 с.
3. Примак, А. В. Защита окружающей среды на предприятиях стройиндустрии [Текст] / А. В. Примак, П. Б. Балтернас. – К. : Будівельник, 1991. – 152 с.
4. Банит, Ф. Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов [Текст] / Ф. Г. Банит, А. Д. Мальгин. – М. : Стройиздат, 1979. – 352 с.
5. Попов, Ю. А. Системы очистки промышленных газов от пыли, применяемые в различных производствах [Текст]. Обзорная информация, серия ХМ–14 / Ю. А. Попов, Ф. Е. Дубинская, Л. Я. Скрябина. – М. : ЦИТИхимнефтемаш, 1984. – 32 с.
6. Ужов, В. Н. Очистка промышленных газов от пыли [Текст] \ В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг, Б. И. Мягков, И. К. Решидов. – М. : Химия, 1981. – 392 с.
7. Физико-химические свойства пыли промышленных нерудных строительных материалов [Текст] : Справочник. – Краснодар : Книжное изд-во, 1974. – 46 с.
8. Страус, В. Промышленная очистка газов [Текст] : Пер. с англ. / В. Страус. М. : Химия, 1981. – 616 с.
9. Бретшнайдер, Б. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль [Текст] : пер. с англ. Под ред. А. Ф. Туболкина / Б. Бретшнайдер, И. Курфюрст. – Л. : Химия, 1989. – 288 с.

10. Кузнецов, И. Е. Оборудование для санитарной очистки газов [Текст] : Справочник / Под общей ред. д-ра техн. наук И. Е. Кузнецова / И. Е. Кузнецов, К. И. Шмат, С. И. Кузнецов. – К. : Техніка, 1989. – 304 с.
11. Циклоны НИИОгаз. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации [Текст]. Ярославль : Верхне-Волжское изд-во, 1971. – 95 с.
12. Якуба, А. Р. Оценка эффективности улавливания пыли циклонами и вихревыми аппаратами [Текст] / А. Р. Якуба, Б. С. Сажин, В. Н. Галич [и др.] // Химическая промышленность, 1984, № 7. – С. 431–432.
13. Сажин, Б. С. Вихревые пылеуловители [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим. М. : Химия, 1995. – 144 с.
14. Галич, В. Н. Многофункциональные вихревые аппараты с активным гидродинамическим режимом [Текст] / В. Н. Галич, В. Е. Секачёв. – М. : МИПК, 1991. – 44 с.
15. Гудим, Л. И. Разработка, исследование и внедрение в промышленность первичной переработки текстильного сырья высокоэффективных систем очистки воздуха вихревыми пылеуловителями [Текст] : дис. ... докт. техн. наук / Л. И. Гудим. – М., 1992. – 403 с.
16. Якуба, А. Р. Гидродинамика и эффективность пылеуловителей с закрученными потоками в процессах химической технологии красителей, пигментов и вспомогательных веществ [Текст] : дис. ... докт. техн. наук / А. Р. Якуба. – Суми, 1996. – 378 с.
17. Янковский, С. С. Основные пути совершенствования аппаратов инерционной очистки газов. Обзорная информация / С. С. Янковский, Л. Я. Градус // Промышленная и санитарная очистки газов. – М. : ЦИНТИ-ХИМНЕФТЕМАШ, 1985. – 47 с.
18. Сажин, Б. С. Результаты испытаний пылеуловителя со встречными закрученными потоками и циклона ЦН-15 [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим, В. Н. Галич, Д. Т. Карпухович, Б. К. Смирнов // Химическая промышленность, 1984, № 10. – С. 626–627.

19. Коузов П. А. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей для очистки вентиляционного воздуха [Текст] / П. А. Коузов, Г. А. Иофинов. – Л. : ВНИИОТ, 1967. – 104 с.
20. Пат. 1208163. ФРГ, 1953, НКИ 50e 3/01-05.
21. Schaufler E. Der Drehstromungsentstauber / E. Schaufler, K.-H. Ochlrich, K.-R. Schmidt // Staub, 1963, 23, № 4. – S. 228–230.
22. Klein H. Entwicklung und Leistungsgrenzen der Drehstromungsentstaubers / H. Klein // Staub Reinhaltung der Luft, 1963, 23, № 11. – S. 491–501.
23. Nickel W. Zur Praxis der Drehstromungsentsaubung / W. Nickel // Staub, 1963, 23, № 11. – S. 509–512.
24. Schmidt K.-R. Fhisialische Grundlagen und Prinzip der Drehstromungsentstaubtrs / K.-R. Schmidt // Staub, 1963, 23, № 24. – S. 207–212.
25. Batel W. Entwicklungsstand und tendenzen bei Fliehkaftenstaubers / W. Batel // Staub Reinhaltung der Luft, 1972, 32, № 9. – S. 349.
26. Сажин, Б. С. Метод расчёта эффективности улавливания пыли аппаратов со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Т. Ю. Векуа, В. А. Реутский // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 1980, № 1. – С. 73–76.
27. Успенский, В. А. К расчёту вихревого пылеулавливающего аппарата / В. А. Успенский, В. И. Соловьёв // Инженерно-физический журнал, 1970, т.18, №3. – С. 459–466.
28. Успенский, В. А. Исследование полей скоростей в вихревом пылеулавливающем аппарате [Текст] / В. А. Успенский, В. И. Соловьёв, В. С. Гурьев // Инженерно-физический журнал, 1971, т. 20, № 6. – С. 1078–1081.
29. Гурьев, В. С., Успенский В. А. Результаты экспериментальных исследований вихревого пылеуловителя / В. С. Гурьев, В. А. Успенский // Промышленная и санитарная очистка газов. – М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1975, № 4. – С. 12–14.

30. Кречин, Ю. В. Результаты заводских испытаний вихревых пылеуловителей [Текст] / Ю. В. Кречин // Промышленная и санитарная очистка газов. – М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1976, №1. – С. 24–25.
31. Успенский, В. А. Пылеулавливающий аппарат типа «Вихрь» [Текст] / В. А. Успенский, В. С. Гурьев, В. А. Уваров // Промышленная и санитарная очистка газов. – М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1978, № 6 – С. 9–10.
32. Klein H. Der Drehstromungsentstauber / H. Klein // Ind. Und Techn., 1966, 18, № 16. – S. 228–235.
33. Klein H. Drehstromungstechnik und ihre Anwendung zur Entstaubung, Sichtung und Trocknung / H. Klein // Chemie–Anlagen+Verfahren, 1969, Helf 4, s. 35–38 ; Helf 1, s. 37–40.
34. Галич, В. Н. Повышение эффективности работы центробежных пылеуловителей за счёт применения встречных закрученных потоков [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. / В. Н. Галич. – М. : МТИ, 1984. – 221 с.
35. Budinsky K. Rotierender Zentrifugalabscheider mit Kontinuerlicher Staubabllitung / K. Budinsky // Staub, 1970, 30, № 91. – S. 366–370.
36. Budinsky K. Die Bewegung der Festen Teilchen im Drehstromung-sentstauber / K. Budinsky // Staub, 1972, 32, № 3. – S. 87–91.
37. Schwaneske R. Vozausberechnung von Entstaubern / R. Schwaneske // Wasser Luft und Betrieb, 1974, 18, № 7. – S. 381–386.
38. А.с. 731993 СССР, МПК В04С 7/00. Вихревой пылеуловитель для очистки запылённых газов / Г. И. Ефремов, В. Н. Ладыжский, И. А. Попов, Б. С. Сажин. Опубл. 1980. Бюл. № 17.
39. А.с. 1058625 СССР, МПК В04С 3/06. Вихревой пылеуловитель / А. Р. Якуба, А. В. Недбайло и др. Опубл. 1983. Бюл. № 45.
40. А.с. 1286297 СССР, МПК В04С 3/06. Аппарат для разделения сред во встречных закрученных потоках / И. А. Петров, С. Ф. Шургальский, Е. В. Фролов и др. Опубл. 1987. Бюл. № 4.

41. А.с. 1103883 СССР, МПК В01D 45/12, В04С 7/00. Вихревой пылеуловитель / Б. С. Сажин, В. Н. Галич, Л. И. Гудим и др. Опубл. 1984. Бюл. № 27.
42. А.с. 1143472 СССР, МПК В04С 3/06. Вихревой пылеуловитель / Л. И. Гудим, Б. С. Сажин, В. Н. Галич. Опубл. 1985. Бюл. № 9.
43. А.с. 1233948 СССР, МПК В04С 3/06. Вихревой пылеуловитель / Б. С. Сажин, Т. А. Баскина и др. Опубл. 1986. Бюл. № 20.
44. А.с. 1327980 СССР, МПК В04С 3/06, 5/18. Вихревой пылеуловитель / Б. С. Сажин, Б. П. Лукачевский и др. Опубл. Б.И., 1987, № 29.
45. А.с. 1535642 СССР, МПК В04С 7/00. Вихревой пылеуловитель / В. Н. Галич. Опубл. 1990. Бюл. № 2.
46. А.с. 1346200 СССР, МПК В04D 45/00, В04С 5/08. Вихревой пылеуловитель / В. С. Гурьев, А. В. Шушляков и др. Опубл. 1987. Бюл. № 39.
47. Мухутдинов, Р. Х. Результаты испытаний вихревых пылеуловителей / Р. Х. Мухутдинов, В. К. Маслов, П. И. Корнилаев // Промышленная и санитарная очистка газов. – М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1980, № 33. – С 9–10.
48. Разработка аппарата с вращающимся потоком газа. Отчёт СФ НИИОГАЗ, тема № 42–63. Ростов–Ярославский, 1965. – 63 с.
49. Исследование вихревого высокоэффективного пылеотделителя с рециркуляцией для химической промышленности и других производств [Текст] // Отчёт СФ НИИОГАЗ, тема № 58–69. Ростов–Ярославский, 1969. – 20 с.
50. Стендовые испытания экспериментального вихревого пылеуловителя со вторичным потоком газа «Вихрь-600» и выдача рекомендаций на его применение [Текст] // Отчёт Семибратовского филиала НИИОГАЗ, 1981. – (Тема № 3254– 81– 7– 2.4). – Семибратово, Ярославская обл.
51. Медников, Е. П. Вихревые пылеуловители [Текст] / Е. П. Медников. — М.:ЦИНТИХимнефтемаш. Серия ХМ-14, 1975.
52. Сажин, Б. С. Однопараметрическая математическая модель гидродинамики сушильного аппарата со встречными закрученными потоками / Б. С. Сажин, Б. П. Лукачевский и др. // ТОХТ, 1976, т. XI, № 4.

53. Сажин, Б. С. Моделирование гидродинамики аппарата со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Б. П. Лукачевский, З. И. Джохадзе, В. Н. Галич // «Водоснабжение и теплоснабжение». Труды Грузинского политехнического института. – Тбилиси, 1984. – С. 132–137.
54. Сажин, Б. С. Аэродинамика и эффективность пылеулавливания многофункциональных аппаратов со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим, Т. Ю. Векуа, М. В. Суворов // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности, 1984, № 6. – С. 66–68.
55. Сажин, Б. С. Подсистема расчёта потерь давления в аппаратах со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Б. П. Лукачевский и др. // ТОХТ, т. 19, №5, 1985. – С. 687–690.
56. Сажин, Б.С., Гудим Л.И. / Пылеуловители со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим // Химическая промышленность, 1985, №8. – С. 50–54 (687–698).
57. Сажин, Б. С. Моделирование движения газа в аппаратах со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Б. П. Лукачевский и др. // ТОХТ, 1985, т. 19, № 5. с. 687–690.
58. Сажин, Б. С. Движение газовой фазы в аппаратах со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим, О. И. Кикалишвили и др. // Известия ВУЗов. Технология текстильной промышленности. 1986, № 1(169). – С. 78–80.
59. Белоусов, А. С. Структура потоков в циклоне [Текст] / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин, А. В. Лопаков и др. // Успехи в химии и химической технологии // РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2006, т. 20, №9 (67). – С.121–123.
60. Белоусов, А. С. Структура потоков в конических вихревых аппаратах [Текст] / Б. С. Сажин, Б. П. Лукачевский, Л. И. Гудим и др. // ТОХТ, 1986. Т. 11, № 4.
61. Сажин, Б. С. Моделирование и исследование гидродинамики аппаратов со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, А. С. Белоусов, Т. Ю. Векуа // 2-е Всесоюзн. научно-техн. совещание «Создание и

внедрение современных аппаратов с активными гидродин. режимами для промышл. и произв. хим. волокон». – М. : МТИ, 1981. – С. 5.

62. Белоусов, А. С. Структура потоков в аппаратах со взвешенным слоем [Текст] / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин, Е. В. Отрубянников // Химическая технология, 2008. Т. 9. № 7.– С.332–336.

63. Сажин, Б. С. Удерживающая способность и структура потоков в вихревых аппаратах [Текст] / Б. С. Сажин, Л. М. Кочетов, А. С. Белоусов // Теоретические основы химической технологии, 2008. Т. 42, № 2. – С. 125–135.

64. Белоусов, А. С. Исследование структуры закрученных потоков с дисперсной фазой [Текст] / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин, В. Б. Сажин и др. // Сборник тез. докл. Междунар. конф. по химической технологии «ХТ–07», Т.2 // Под ред. А. А. Волошкина. М.: ЛЕНАНД, 2007. – С.134–136.

65. Белоусов, А. С. Влияние режима работы и конструкции на характеристики вихревого аппарата [Текст] / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин, А. В. Лопиков // Успехи в химии и химической технологии. Т. 20. М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2006, № 2 (60). – С. 94–97.

66. Белоусов А. С. Поля скоростей в вихревых аппаратах [Текст] / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2006, № 2. – С. 100–105.

67. Сажин Б. С. Турбулентные и вихревые течения в аппаратах со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. С. Сажин, А. С. Белоусов // Межвузовский сборник научных трудов «Аппараты с активными гидродинам. режимами для текстильной промышл. и производства хим. волокон». – М. : МТИ., 1983. – С.17–21.

68. Кикалишвили, О. В. Математическое моделирование процесса грануляции в аппарате фонтанирующего слоя с дополнительным карусельным вводом теплоносителя [Текст] / О. И. Кикалишвили, Б. П. Лукачевский // Вторая Всесоюзн. научно-технич. конференция «Повышение эффективности тепломассообм. и гидродин. проц. в текстильной промышл. и производстве химических волокон». М.: МТИ, 1984. – С. 36.

69. Векуа, Т. Ю. Исследование гидродинамики многофункциональных аппаратов со встречными закрученными потоками [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Т. Ю. Векуа. – М. : МТИ, 1979. – 220 с.
70. Фокин, И. Ф. Исследование процесса сушки и разработка рациональной конструкции аппаратов для сушки дисперсных материалов в закрученных потоках [Текст]. Автореферат Дисс. канд. наук. – М. : МТИ, 1981.
71. Буяров, А. И. Выбор гидродинамических режимов для сушки материалов во встречных закрученных потоках [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук. / А. И. Буяров. – М. : МТИ, 1982. – 202 с.
72. Гудим, Л. И. Сравнительные испытания пылеуловителя со встречными закрученными потоками и циклона ЦН-15 [Текст] / Л. И. Гудим, Б. С. Сажин // 2-я Всесоюзн. научн. конф. «Повышение эффективности тепломассообменных и гидродинам. процессов текстильной промышл. и производства химических волокон». М. : МТИ, 1985. – С. 101.
73. Акулич, А. В. Разработка безуносного вихревого аппарата для сушки дисперсных материалов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. / А. В. Акулич. – М. : МТИ. – 1987. – 314 с.
74. Якуба, А. Р. Сравнение эффективности улавливания циклонами и вихревыми пылеуловителями [Текст] / А. Р. Якуба, В. Н. Галич // 2-е Всесоюзн. научно-технич. совещание «Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамич. режимами для текстильной пром. и произв. химич. волокон». М. : МТИ, 1981. – С. 145.
75. Латкин, А. С. Исследование процесса смешения в аппарате ВЗП [Текст] / А. С. Латкин // 2-е Всесоюзн. научно-технич. совещание «Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамич. режимами для текстильной пром. и произв. химич. волокон». М. : МТИ, 1981. – С. 160.
76. Джохадзе, З. И. Оросительная камера со встречными закрученными потоками [Текст] / З. И. Джохадзе // Водобеспечение и теплоснабжение. Труды Грузинского политехнического института. Тбилиси, 1981. – С. 39.

77. Шульчишин, В. А. О закономерностях процесса получения микрогранулированных выпускных форм красителей в аппаратах со встречными закрученными потоками [Текст] / В. А. Шульчишин, Б. С. Сажин, М. А. Семёновский // 2-е Всесоюзн. научно-технич. совещание «Создание и внедрение соврем. аппаратов с активными гидродинамич. режимами для текстильной пром. и произв. химич. волокон». М. : МТИ, 1981. – С. 7.
78. Белоусов, А. С. Закрутка потоков в вихревых аппаратах [Текст] / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2005, № 3. – С. 96–100.
79. Белоусов, А. С. К расчёту потерь давления в вихревом аппарате [Текст] / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин, А. В. Лопаков // Успехи химии и химической технологии. Т. 19. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева. 2005, № 10 (58). – С. 62–64.
80. Белоусов, А. С. Радиальный сток в центробежных пылеуловителях / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин // Известия вузов. Технология текстильной промышленности, 2006, № 4. – С. 96–100.
81. Лукачевский, Б. П. Моделирование процесса образования вращающегося кольца твёрдых частиц в аппарате со встречными закрученными потоками [Текст] / Б. П. Лукачевский, А. И. Буяров, В. Н. Галич / Тезисы конф. проф.-препод. состава, научн. сотр. и аспирантов. «Современные проблемы развития текстильной промышл.и задачи подгот. инж. кадров». – М. : МТИ, 1982. – С. 119.
82. Белоусов, А. С. Моделирование движения твёрдой фазы в безуносных аппаратах со встречными закрученными потоками [Текст] / А. С. Белоусов // Конф. проф. - препод. состава, научн. сотр. и аспирантов. «Современные проблемы развития текстильной промышл.и задачи подгот. инж. кадров». – М. : МТИ, 1982. – С. 122.
83. Земляков, Н. В. Гидродинамические особенности встречных закрученных потоков, содержащих твёрдую фазу гранулируемого продукта [Текст] /

- Н. В. Земляков, А. И. Буяров // Межвуз. сборник научных трудов «Аппараты с активн. гидродинам. режимами для текстильной промышл. и произв. химич. волокон. – М. : МТИ, 1983. С. 36–37.
84. Лебедев, В. Я. Теоретические основы создания безуносных комбинированных сушилок с активными гидродинамическими режимами [Текст] / В. Я. Лебедев, Е. П. Барулин, В. Н. Кисельников // Межвуз. сб. научн. трудов «Аппараты с активн. гидродинам. режимами для текстильной промышл. и производства химич. волокон. – М. : МТИ, 1983. С. 113–115.
85. Омельчук, В. С. О возможности использования аппаратов со встречными закрученными потоками в качестве увлажнителя воздуха [Текст] / В. С. Омельчук, З. И. Джохадзе // Межвуз. сб. научн. трудов «Аппараты с активн. гидродинам. режимами для текстильной промышл. и производства химич. волокон. – М. : МТИ, 1983. С. 126–128.
86. Юфа, А. И. Поле скоростей газовой фазы в сушилке ВЗП с вихревой камерой [Текст] / А. И. Юфа, Я. Д. Мухиддинова, Х. Р. Сайдаминов // 2-я Всесоюзн. научно-техн. конфер. «Повышение эффективности тепломассообм. и гидродинамических процессов текстильной промышл. и производства хим. волокон». – М. : МТИ, 1985. – С. 13.
87. Фокин, И. Ф. Оптимизация режимно-конструктивных параметров аппарата со встречными закрученными потоками при ведении в нём процессов тепло- и массообмена [Текст] / И. Ф. Фокин, М. Ш. Джунисбеков, М. Ф. Беркман // 2-я Всесоюзн. научно-техн. конфер. «Повышение эффективности тепломассообм. и гидродинамич. процессов текстильной промышл. и производства хим. волокон». – М. : МТИ, 1985. – С. 39–40.
88. Яковлев, А. Ю. Моделирование процесса разделения частиц в закрученных потоках [Текст] / А. Ю. Яковлев, О. Л. Васильева, Т. Ю. Векуа // Тез. докл. 2-й Всесоюзн. научно-техн. конфер. «Повышение эффективности тепломассообм. и гидродинамич. процессов текстильной промышл. и производства хим. волокон». – М. : МТИ, 1985. – С. 48.

89. Гвоздев, В. Д. Комбинированная сушилка со взвешенным слоем / В. Д. Гвоздев, И. Г. Соловьёв, В. Д. Горячев, В. В. Лебедев // 2-я Всесоюзн. научно-техн. конференция «Повышение эффективности тепломассообм. и гидродинамич. процессов текстильной промышл. и производства хим. волокон». – М. : МТИ, 1985. – С. 49.
90. Омельчук, В. С. Камера орошения со встречными закрученными потоками и её типоразмеры [Текст] / В. С. Омельчук, З. И. Джохадзе // 2-я Всесоюзная научно-техн. конфер. «Повышение эффективности тепломассообм. и гидродинамич. процессов текстильной промышл. и производства хим. волокон». – М. : МТИ, 1985. – С. 102–103.
91. Кикабидзе, Н. И. Разработка пылеуловителя со встречными закрученными потоками с водяным орошением [Текст] / Н. И. Кикабидзе // 2-я Всесоюзн. научно-техн. конфер. «Повышение эффективности тепломассообм. и гидродинамич. процессов текстильной промышл. и производства хим. волокон». – М. : МТИ, 1985. – С. 108.
92. Белоусов А.С.Яковлев А.Ю. Определение фракционных характеристик классификаторов и пылеуловителей со встречными закрученными потоками [Текст] / А. С. Белоусов, А. Ю. Яковлев // Межвуз. сборн. научн. трудов «Повышение эффективн. технологич. проц. и оборудов. в текстильной промышл. и производстве хим. волокон и разработка систем пылеулавливания» – М. : МТИ, 1988. – С. 3.
93. Галич, В. Н. Абсорбция в многофункциональных вихревых аппаратах [Текст] / В. Н. Галич, Д. И. Белкин, Р. В. Галич // Сборн. научн. трудов «Работы в области массообменных процессов за период 1986– 1990 гг. по координац. плану головного подразделения (абсорбция, ректификация, экстракция)». – Северодонецк, 1989. – С. 108–110.
94. Генькин, Я. М. Исследование гидродинамики процесса сушки жидких продуктов в аппарате взвешенного слоя со встречными закрученными потоками [Текст] / Я. М. Генькин, А.П. Рысин, Э. И. Хорошая, М. Б. Сергеев // Тезисы докл. 3-й Всесоюзн. научно-технич. конференции «Создание и

внедрение соврем. аппаратов с активн. гидродинамич. режимами для текстильн. промышл. и произв. хим. волокон» – М. : ЦНИИТЭИлегпром, 1989. – С. 29.

95. Якуба, А. Р. Оценка эффективности улавливания пыли циклонами и вихревыми аппаратами [Текст] / А. Р. Якуба, Б. С. Сажин, В. Н. Галич // Химическая промышленность, 1984, № 7. – С. 431–432.

96. Якуба, А. Р. Расчёт гидравлического сопротивления центробежных пылеуловителей со встречными закрученными потоками [Текст] / А. Р. Якуба, В. М. Герасимив и др. // Вісник СумДУ. Науковий журнал. Серія : Технічні науки (Машинобудування) – Суми : СумДУ, 2000. – С. 8–14.

97. Герасимив, В. М. Теоретический расчёт гидравлических потерь давления центробежных пылеуловителей со встречными закрученными потоками [Текст] / В. М. Герасимив, А. Р. Якуба, С. А. Тимчук // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сборник научных трудов. – Харьков, 2001, № 10. – С. 113–121.

98. Якуба, А. Р. Структура потоков аппаратов со встречными закрученными потоками [Текст] / А. Р. Якуба, В. М. Герасимив, С. А. Тимчук // VI Междунар. Конференция «Гидромеханика в инженерной практике». – Киев–Харьков, 2001. – С. 8–16.

99. Герасимив, В. М. Расчёт фракционной эффективности аппаратов со встречными закрученными потоками [Текст] / В. М. Герасимив, А. Р. Якуба // Вісник СумДУ. Науковий журнал. Серія : Технічні науки (Машинобудування) – Суми : СумДУ, 2002, № 9. – С. 60–67.

100. Герасимив, В. М. Структура потоков АВЗП [Текст] / В. М. Герасимив, А. Р. Якуба, С. А. Тимчук // Вісник сумської аграрної академії. Науковий журнал. – Суми : СНАУ, 2002, № 9. – С.135–138.

101. Якуба, А. Р. Исследование вращающегося потока в выходном патрубке вихревого аппарата со встречными закрученными потоками [Текст] / А. Р. Якуба, Н. И. Азаров, Р. В. Галич, В. Н. Галич, В. К. Кияшко // VI Міжнар.

науково-практ. конференція “Наука і освіта 2003”. Технічні науки. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2003, т. 12. – С. 52–53.

102. Галич, Р. В. Вихревые аппараты с контактным модулем [Текст] / Р. В. Галич, А. Р. Якуба, С. А. Тимчук, В. Н. Галич // III Міжнар. науково-практ. конф. «Динаміка наукових досліджень «2004». Екологія. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2004, т. 34. – С.15–16.

103. Якуба, А. Р. О гидравлических потерях в выходном патрубке вихревых аппаратов [Текст] / А. Р. Якуба, Р. В. Галич, В. Н. Галич, С. А. Тимчук // III Міжнар. науково-практ. конф. «Динаміка наукових досліджень «2004». Технічні науки. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2004, т. 60. – С. 72–74.

104. Галич, Р. В. Многофункциональные вихревые аппараты [Текст] / Р. В. Галич, А. Р. Якуба. Науково-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених “Технологія – 2004”. – Северодонецьк, 2004. – С. 33.

105. Галіч, Р. В. Поле швидкостей в апаратах із зустрічними закрученими потоками [Текст] / Р. В. Галіч, О. Р. Якуба, В. М. Галіч / Вісник СНАУ. Науково-методичний журнал. Серія : Механізація та автоматизація виробничих процесів. – Суми : СНАУ, 2004, вип. 12. – С. 16–20.

106. Якуба, О. Р. Підвищення ефективності очищення і сушіння зерна за рахунок використання вихрових сепараторів [Текст] / О. Р. Якуба, Р. В. Галіч, В. М. Галіч, С. О. Тимчук // Вісник СНАУ. Науково-метод. журнал. Серія : Механізація та автоматиз. виробн. процесів. – Суми : СНАУ, 2005, вип. 13. – С. 52 – 61.

107. Якуба, О. Р. Удосконалення моделей розрахунку структури потоків апаратів із зустрічними закрученими потоками [Текст] / О. Р. Якуба, Р. В. Галіч, О. М. Калашніков // Вісник СНАУ. Науково-метод. журнал. Серія : Механізація та автоматиз. виробн. процесів. – Суми : СНАУ, 2006, вип. 9 (15). – С. 48–55.

108. Якуба, О. Р. Уточнення залежностей фракційної ефективності апаратів із зустрічними закрученими потоками (АЗЗП) [Текст] / О. Р. Якуба, Р. В. Галіч, О. М. Калашніков // Вісник СНАУ. Науково-методичний журнал.

Серія : Механізація та автоматизація виробничих процесів. – Суми : СНАУ, 2006, вип. 9 (15). – С. 32–41.

109. Галич, Р. В. Применение вихревых аппаратов в системах подготовки и сушки зерновых [Текст] / Р. В. Галич, А. Р. Якуба, В. Н. Галич // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія : Технічні науки. – Луганськ : ЛНАУ, 2006, № 65/88. – С. 87 – 92.

110. Галіч, Р. В. Модель структури потоків апаратів із зустрічними закрученими потоками [Текст] / Р. В. Галіч, О. Р. Якуба, В. М. Галіч // II Міжнар. науково-практ. конфер. «Дні науки – «2006» (17–28 квітня 2006 р.). Технічні науки. – Дніпропетровськ : Наука і освіта. 2006, т.8. – С. 33–36.

111. Галіч, Р. В. Розрахунок фракційної ефективності апаратів із зустрічними закрученими потоками [Текст] / Р. В. Галіч, О. Р. Якуба, В. М. Галіч // II Міжнар. науково-практ. конф. «Дні науки – «2006» (17– 28 квітня 2006 р.). Екологія. – Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2006, т.13. – С. 48–51.

112. Галіч, Р. В. Моделювання процесу сепарації частинок пилу в системі зустрічних закручених потоків [Текст] / Р. В. Галіч, О. Р. Якуба // Друга Всеукраїнська науково-практ. конф. «Актуальні проблеми створення електронних засобів промислових автоматизованих систем» (29-30 листопада 2012р.). – Сєвєродонецьк : СТІ, 2012. – С. 111–113.

113. Якуба, А. Р. Структура потоков в конических вихревых аппаратах [Текст] / А. Р. Якуба, Б. И. Зуган // III Всесоюзн. научно-техн. конф. «Создание и внедрение соврем. аппаратов с активн. гидродинам. режимами для текстильной промышл. и производства химических волокон М. : ЦНИИТЭИлегпром, 1989. – С. 57.

114. Аэродинамика закрученной струи [Текст] / Под ред. Ахмедова Р. Б. – М. : Энергия, 1977. – 240 с.

115. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха [Текст] / А. И. Пирумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1981. – 296 с.

116. Приходько, В. П. Центробежные каплеуловители с лопастными завихрителями [Текст] / В. П. Приходько, В. Н. Сафонов, Г. К. Лебедюк. (Серия

- ХМ-14. Промышленная и санитарная очистка газов). – М. : ЦИНТИХИМ–НЕФТЕМАШ, 1979. – 50 с.
117. Podgorski, W. Budownictwo gorniczo–przemyslowe i kopalnictwo / W. Podgorski. – 1975, № 2. – P. 1–11.
118. Якуба, О. Р. Удосконалення моделей розрахунку фракційної ефективності протитечних пиловловлювачів [Текст] / О. Р. Якуба, Р. В. Галич // Вісник Сумського національного університету (СНАУ). Науково-методичний журнал. Серія : Будівництво. Вип. 8(17), 2013. – С. 118 – 123.
119. Ciliberti, D. F. Aer improvement of simple model for rotory flow cyclones / D. F. Ciliberti, B. W. Lankaster // Alche journal, 1976. – V. 22. – № 6. – P. 1150–1152.
120. Галич, Р. В. Влияние раскручивающих устройств на гидродинамику и энергоэффективность центробежных пылеуловителей [Текст] / Р. В. Галич, А. Р. Якуба, В. И. Склабинский, В. Я. Стороженко // Вопросы химии и химической технологии. 2014, № 1. – С. 159–164.
121. Barth W. Berechnung und Auslegung von zyklonabscheidern auf Grund neuerer Untersuchungen / W. Barth. // Brenstoff-warme-kraft. – 1956. – Bd. 8, № 1. – S. 1–10.
122. Якуба, А. Р. Расчёт гидравлического сопротивления центробежных пылеуловителей со встречными закрученными потоками [Текст] / А. Р. Якуба, С. А. Кузько, А. Н. Калашников и др. // Вісник СумДУ. Науковий журнал. Серія : Технічні науки (Машинобудування) – Суми : СумДУ, 2000, № 15. – С. 8–15.
123. Методика определения дисперсного состава промышленных пылей в процессах газоочистки [Текст]. Руководящий технический материал МИНХИММАШ. РДРТМ 26–14– 20– 79. – М. : 1979. – 91 с.
124. Булгакова, Н. Г. Измерение дисперсного состава промышленных пылей (НИИОГАЗ) [Текст] / Н. Г. Булгакова, Е.А. Петербургская // Промышленная и санитарная очистка газов (Серия ХМ-14. Обзорная информация). – М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981. – 41 с.

125. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов [Текст] / П. А. Коузов. – 3-е изд. перераб. – Л. : Химия, 1987. – 264 с.
126. Лебедюк, Г. К. Сравнительные измерения дисперсного состава пылей в газовом потоке с помощью различных приборов [Текст] / Г. К. Лебедюк, С. С. Янковский, Н. Г. Булгакова, Л. Я. Градус // Промышленная и санитарная очистка газов. – М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1983, № 3. С. 18–19.
127. Булгакова, Н. Г. Импактор для дисперсного анализа субмикронных частиц [Текст] / Н. Г. Булгакова, Д. Л. Зеликсон // Промышленная и санитарная очистка газов. – М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1979. – С. 19–20.
128. Булгакова, Н. Г. Калибровка импакторов [Текст] / Н. Г. Булгакова, Д. Л. Зеликсон // Промышленная и санитарная очистка газов. – М. : ЦИНТИХИМ–НЕФТЕМАШ, 1980, № 1. – 21 с.
129. Градус, Л. Я. Краткая инструкция по определению дисперсного состава пылей с помощью малогабаритных струйных осадителей [Текст] / Л. Я. Градус, С. С. Янковский. – М. : НИИОГАЗ, 1988. – 26 с.
130. Галич, Р. В. Разработка и внедрение пылеуловителей со встречными закрученными потоками [Текст] / Р. В. Галич // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2014, № 3. – С. 12–15.
131. Техническое описание и инструкция по эксплуатации устройства для отбора проб пыли из пылегазовых потоков ПОУ–1 [Текст] // Семибратовский филиал НИИОГАЗ, 1992. – 47 с.
132. Горлин, С. М. Аэромеханические измерения. Методы и приборы [Текст] / С. М. Горлин, И. И. Слезингер. – М. : Наука, 1984. – 612 с.
133. Испытание обеспыливающих вентиляционных установок [Текст]. Инструктивно-методические материалы. – Ленинград : ЛИОТ, 1971. – 163 с.
134. Булгакова, Н. Г. Инструкция по определению запылённости газов в производственных условиях [Текст] / Н. Г. Булгакова, С. С. Янковский. – М. : НИИОГАЗ, 1978.

135. Yakuba A. The investigation and Working out of drop- and dust catchers for compressor station / A. Yakuba, S. Sabadach, M. Savchenko // International Conference on Compressors and their systems (7–9 september 2009). – Institution of MECHANICAL ENGINEERS, City University London, 2009. – S. 421–431.
136. Рябчиков, С. Я. Пылевывозные устройства для аппаратов газоочистки [Текст] / С. Я. Рябчиков, Е. И. Андрианов // Промышленная и санитарная очистка газов (Обзорная информация. Серия ХМ-14. М. : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1981. – 39 с.
137. Галич, Р. В. К вопросу осаждения твёрдых частиц на поверхность жидкости [Текст] / Р. В. Галич, А. Р. Якуба, В. И. Склабинский, В. Я. Стороженко // Вісник СумДУ. Науковий журнал. Серія : Технічні науки, 2013, № 1. – С. 61–77.
138. Пустыльник, Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений [Текст] / Е. И. Пустыльник. – М. : Наука, 1968. – 128 с.
139. Батунер, Л. М. Математические методы в химической технике [Текст] / Л. М. Батунер, Позин М. Е. – Л. : Химия, 1971. – 824 с.
140. Грушко, И. М. Основы научных исследований [Текст] / И. М. Грушко, В. М. Сиденко. – Харьков, «Вища школа», 1983. – 224 с.
141. Бобровников, Н. А. Охрана воздушной среды от пыли на предприятиях строительной индустрии [Текст] / Н. А. Бобровников. – М. : Стройиздат, 1981. – 99 с.
142. Гудим, Л. И. Очистка промышленных газов и воздуха от пыли [Текст] / Л. И. Гудим, Б. С. Сажин // М. : МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2010. – 116 с.
143. Петрухин, П. М. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах [Текст]. / П. М. Петрухин, Г. С. Гродель, Н. И. Жилиев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. М. : Недра, 1981. – 271 с.
144. Галич, Р. В. Очистка воздуха в шахтах Донбасса вихревыми аппаратами со встречными закрученными потоками [Текст] / Р. В. Галич // VI Междунар. научно-практич. конференция «Экономические, экологические и социальные проблемы угольных районов СНГ». – Краснодар, 2013. – С. 15–18.

146. Белоглазов, И. Н. Интенсификация и повышение эффективности химико–технологических процессов [Текст] / И. Н. Белоглазов, А. И. Муравьев. – Л. : Химия, 1988. – 206 с.
147. Галич, Р. В. Конструктивное усовершенствование вихревых аппаратов со встречными закрученными потоками [Текст] / Р. В. Галич, А. Р. Якуба, В. И. Склабинский, В. Я. Стороженко // Хімічна промисловість України, 2013, № 3. – С. 75–83.
148. Патент 80028 Україна, МПК В01D 45/12, В04С 7/00. Вихровий пилоуловлювач / Р. В. Галіч, О. Р. Якуба, В. І. Склабінський, В. Я. Стороженко. – № и 2012 13437; заявл. 26.11.12; опубл. 13.05.13, Бюл. № 9. – 6 с.
149. Патент 81163 Україна, МПК В01D 45/12, В04С 7/00. Контактний модуль / Р. В. Галіч, О. Р. Якуба. – № и 2012 14463; заявл. 16.12.12; опубл. 25.06.13, Бюл. № 12. – 4 с.

ДОДАТОК А

Розрахунок енергетичних втрат моделі ВАЗЗПЦ–400

Позначення :

$$\Delta P_{вх} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{V_{\varphi a}^2 \cdot r_a}{r_4} - \frac{V_{\varphi 4}^2 \cdot r_4}{r_a} + V_{\varphi 4}^2 \right) \quad \text{– вхідні втрати тиску, Па ;}$$

$$\Delta P_{вих} = \frac{\rho}{2} \cdot V_{s4}^2 \left[K \left(\frac{V_{\varphi 4}}{V_{s4}} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{V_{\varphi 4}}{V_{s4}} \right)^2 \right] \quad \text{– вихідні втрати тиску, Па,}$$

де V_{φ}, V_z – тангенціальна і аксіальна швидкість потоку відповідно, м/с ;

a – відноситься до сепараційної камери ; 4 – відноситься до вихідного патрубку ;

$K = 4,4$ – парціальний коефіцієнт моделі ВАЗЗПЦ.

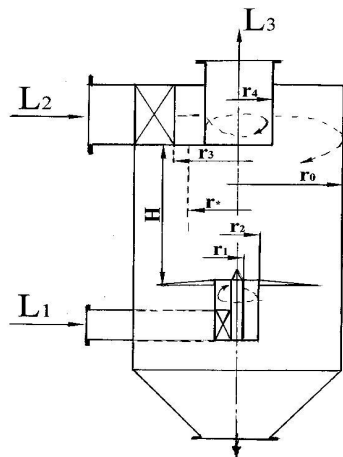


Рис. 1 – Розрахункова схема моделі ВАЗЗПЦ

[122]

Геометричні співвідношення визначних конструктивних елементів ВАЗЗПЦ–400 та вихідні режимні параметри надані в таблиці А.1

Таблиця А.1

Умовні позначення і співвідношення розмірів основних елементів
ВАЗЗПЦ–400

Позначення	Найменування параметра	Величина
L_3	Загальна витрата повітря, м ³ /с (нм ³ /год)	1,00 (3600)
L_1	Витрата первинного потоку, м ³ /с (нм ³ /год)	0.200 (720)
L_2	Витрата вторинного потоку, м ³ /с (нм ³ /год)	0.800 (2880)
K	Кратність потоків ($K = L_2/L_3$)	0,80
V_a	Середня швидкість потоку, віднесена до	7.96

	поперечного перерізу сепараційної камери $м/с$	
H	Висота сепараційної камери, м	0.800
r_0	Радіус сепараційної камери, м	0.200
r_1	Радіус витискувача, м	0,040
r_2	Радіус первинного завихрувача, м	0.100
$r_3 = r_*$	Радіус циліндра поділу потоків, м	0,120
$r_4 = r_*$	Радіус вихідного патрубку, м	0,120

Зовнішні умови : температура повітря $t = 20^0 C$; в'язкість повітря при $t = 20^0 C$ $\mu = 18.1 \cdot 10^{-6} Па \cdot c$; тиск атмосферний $p_{атм.} = 1000$ Па ; вологість повітря $\varphi = 75\%$; щільність повітря в нормальних умовах:

$$\rho_{20} = 1,293 \cdot \frac{T_0}{T_0 + t} = 1,293 \cdot \frac{273}{273 + 20} = 1,21 \text{ кг} / \text{м}^3,$$

$$\rho_n = 1,21 \text{ кг} / \text{м}^3 \text{ (при } t = 20^0 C, p = 1 \text{ ат} = 1000 \text{ Па)}.$$

Гідравлічний опір від проходження потоку через вторинний канал.

Функція току на стінці вихідного патрубку :

$$\psi_{2*} = \frac{L_1^1}{2\pi} + \left[1 + \frac{r_*^2 - r^2}{r_0 - r_*^2} \right] \cdot \left[\frac{L_2^1}{2\pi} + A \cdot r_* \cdot (z - H) \right],$$

де $\psi_{2*} = \psi_{2,4} = \frac{L_1^1}{2\pi} + \frac{L_2^1}{2\pi}$ – функція току на границі розділу первинного і вторинного потоків ($r = r_*$).

Розрахунок проводиться для випадку проходження всього потоку (L_3) через вторинний вхідний канал апарата при відсутності первинного потоку. Тоді : L_1^1 і L_2^1 – значення витрат роздвоєння вторинного потоку на дві складові

$$L_1^1 = L_3 \cdot k_r, \quad L_2^1 = L_3(1 - k_r),$$

де k_r – коефіцієнт роздвоєності потоку. Потік L_1^1 проникає у вихровий рівномірно по всій висоті H сепараційної камери, а потік L_2^1 доходить до рівня відбійної шайби, розвертається на 180^0 і рухається вгору. Для моделі ВАЗЗПЦ k_r приймається як усереднений $k_r = 0,35$.

$$L_1^1 = 1.00 \cdot 0.35 = 0.35; \quad L_2^1 = 1.00 \cdot 0.65 = 0.65.$$

Усереднена радіальна швидкість потоку :

$$A = \frac{L_2^1}{2\pi \cdot r_* \cdot H} = \frac{0.65}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.120 \cdot 0.8} = 1.078 \text{ м/с.}$$

Функція току на межі поділу потоків у верхній частині апарата :

$$r = r_*, \quad z = H, \quad \psi_{2^*H} = \frac{L_3}{2\pi} = \frac{1.00}{2 \cdot 3.14} = 0.1592 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Тангенціальна швидкість на межі розділення потоків :

$$V_\varphi = \frac{\pi \cdot r_*^2 \cdot C_0 \cdot \psi_{2^*}}{2L_3 \cdot r_*}.$$

Кутова швидкість в циліндричному вихідному патрубку :

$$C_0 = \frac{4V_{e2}(r_0^3 - r_3^3)}{3r_4^2(r_0^2 - r_3^2)}, \text{ с}^{-1},$$

де $V_{e2} = \frac{L_3}{f_2}$ – вхідна лінійна швидкість потоку, м/с ;

$$f_2 = a_2 \cdot b_2 = 0.264 \cdot 0.08 = 0.02112 \text{ м}^2 \text{ – переріз вторинного каналу.}$$

$$V_{e2} = \frac{1.00}{0.02112} = 47.35 \text{ м/с}; \quad C_0 = \frac{4 \cdot 47.35}{3 \cdot 0.120^2} \cdot \frac{(0.2^3 - 0.12^3)}{(0.2^2 - 0.12^2)} = 1074 \text{ с}^{-1}.$$

$$V_{z^*H} = \frac{3.14 \cdot 0.12^2 \cdot 1074 \cdot 0.1592}{2 \cdot 1.00 \cdot 0.12} = 32.21 \text{ м/с.}$$

Функція току на межі розподілу потоків в нижній частині апарата :

$$r = r_*, \quad z = 0,$$

$$\psi_{2^*0} = \frac{L_1^1}{2\pi} + 1 \cdot \left[\frac{L_2^1}{2\pi} - A \cdot r_* \cdot H \right] = \frac{0.35}{2 \cdot 3.14} + \left(\frac{0.65}{2 \cdot 3.14} - 1.078 \cdot 0.12 \cdot 0.8 \right) = 0.0557 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$V_{z^*0} = \frac{\pi \cdot r_*^2 \cdot C_0 \cdot \psi_{2^*0}}{2L_3 \cdot r_*} = \frac{3.14 \cdot 0.120^2 \cdot 1074 \cdot 0.0557}{2 \cdot 1.00 \cdot 0.120} = 11.27 \text{ м/с.}$$

$$V_{s^*сep.} = \frac{V_{s^*H} + V_{s^*0}}{2} = \frac{32.21 + 11.27}{2} = 21.74 \text{ м/с.}$$

Осьова швидкість потоку в каналі вихідного патрубка :

$$V_{z4} = \frac{4L_3}{\pi \cdot d_4^2} = \frac{4 \cdot 1.00}{3.14 \cdot 0.240^2} = 22.16 \text{ м/с.}$$

Відношення тангенціальної та осьової швидкостей :

$$\frac{V_{\varphi 4}}{V_{s4}} = \frac{V_{\varphi^{*cep.}}}{V_{s4}} = \frac{21.74}{22.16} = 0.981.$$

Визначення швидкості потоку на стінці сепараційної камери ($V_a = V_0$).

Функція току в точці $z = H$, $r = r_0 = r_a$:

$$\psi_{2a} = \frac{L_1^1}{2\pi} + [1-1] \cdot \left[\frac{L_2^1}{2\pi} + A \cdot (z - H) \right] = \frac{L_1^1}{2\pi} = \frac{0.35}{2 \cdot 3.14} = 0.0557 \text{ м}^3 / \text{с},$$

$$V_{aH} = \frac{\pi \cdot r_4^2 \cdot C_0 \cdot \psi_{2a}}{2L_3 \cdot r_a} = \frac{3.14 \cdot 0.120^2 \cdot 1074 \cdot 0.0557}{2 \cdot 1.00 \cdot 0.200} = 6.76 \text{ м} / \text{с}.$$

Функція току в точці $z = 0$, $r = r_0$:

$$\psi_2 = \frac{L_1^1}{2\pi} + [1-1] = \frac{L_1^1}{2\pi} = \frac{0.35}{2 \cdot 3.14} = 0.0557 \text{ м}^3 / \text{с},$$

$$V_{a0} = V_{acep.} = 6.76 \text{ м} / \text{с}.$$

Вхідні втрати тиску :

$$\Delta P_{ex} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{V_a^2 \cdot r_a}{r_4} - \frac{V_4^2 \cdot r_4}{r_a} + u_4^2 \right) = \frac{1.21}{2} \left(\frac{6.76^2 \cdot 0.200}{0.120} - \frac{21.74^2 \cdot 0.120}{0.200} + 21.74^2 \right) = 166,5 \text{ Па}.$$

Вихідні втрати тиску :

$$\Delta P_{вих} = \frac{\rho}{2} \cdot v_4^2 \left[k \left(\frac{V_{\varphi 4}}{V_{s4}} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{V_{\varphi 4}}{V_{z4}} \right)^2 \right] = \frac{1.00}{2} \cdot 22.16^2 \left[4.4 \left(\frac{21.74}{22.16} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{21.74}{22.16} \right)^2 \right] = 1289.5 \text{ Па}.$$

Загальний опір руху потоку по вторинному каналу :

$$\Delta P_2 = \Delta P_{ex.} + \Delta P_{вих.} = 166,5 + 1289.5 = 1456 \text{ Па}.$$

Коефіцієнт гідравлічного опору вторинного вхідного каналу :

$$\xi_{02} = \frac{2\Delta P_2}{\rho_z \cdot v_a^2} = \frac{2 \cdot 1456}{1.21 \cdot 7.96^2} = 37,97.$$

Умовна швидкість потоку в сепараційній камері :

$$v_a = \frac{4L_3}{\pi \cdot D_0^2} = \frac{4 \cdot 1.00}{3.14 \cdot 0.400^2} = 7.96 \text{ м} / \text{с}.$$

Гідравлічний опір від проходження потоку через первинний канал.

Як і раніше, припускаємо, що весь потік газу з витратою $L_3 = 1.00 \text{ м}^3 / \text{с}$ проходить через первинний завихрувач. Основна частина вихрового потоку

$L_1^1 = (1-k)L_3 = 0.65 \text{ м}^3/\text{с}$ рухається по осі знизу вгору у вихідний патрубок, а менша частина $L_2^1 = k \cdot L_3 = 0.35 \text{ м}^3/\text{с}$ рухається уздовж стінки сепараційної камери вгору і проникає в центральну зону, поступово зливаючись з центральним вихровим потоком.

Функція току в точці $z = 0, r = r_* = 0.12 \text{ м}$:

$$\psi_1 = \frac{L_1^1}{2\pi} + \frac{L_2^1}{2\pi} \left[1 - \frac{r_*^2 - r^2}{r_0^2 - r_*^2} \right] + A \cdot r_* \left[\frac{r_*^2 - r^2}{r_0^2 - r_*^2} \cdot z + (z - H) \right],$$

$$A = \frac{L_2^1}{2\pi \cdot H \cdot r_*} = \frac{0.35}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.8 \cdot 0.120} = 0.5805 \text{ м/с},$$

$$\psi_1 = \frac{0.65}{2 \cdot 3.14} + \frac{0.35}{2 \cdot 3.14} \cdot 1 + 0.5805 \cdot 0.12 \cdot (-0.8) = 0.1035 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Лінійна швидкість потоку на виході з первинного завихрувача :

$$V_4 = \frac{L_3}{f_1} = \frac{L_3}{a_1 \cdot b_1} = \frac{1.00}{0.2 \cdot 0.06} = 83.33 \text{ м/с},$$

де $a_1 \cdot b_1 = 0.2 \cdot 0.06 = 0.0012 \text{ м}^2$ площа вхідного каналу первинного потоку.

Кутова швидкість обертання повітряного потоку у вихідному патрубку:

$$C_0 = \frac{4 \cdot V_4 (r_2^3 - r_1^3)}{3r_4^2 (r_2^2 - r_1^2)} = \frac{4 \cdot 83.33 \cdot (0.1^3 - 0.04^3)}{3 \cdot 0.12^2 \cdot (0.1^2 - 0.04^2)} = 859.53 \text{ с}^{-1}.$$

Функція току і тангенціальна швидкість $z = 0, r = r_* = r_4 = 0.120 \text{ м}$.

$$\psi_{1*0} = 0.1035 \text{ м}^3/\text{с}, \quad C_0 = 859.53 \text{ с}^{-1},$$

$$V_{\varphi*0} = \frac{\pi \cdot r_* \cdot C_0 \cdot \psi_2}{2L_3} = \frac{3.14 \cdot 0.120 \cdot 859.53 \cdot 0.1035}{2 \cdot 1.00} = 16.76 \text{ м/с}.$$

Ці ж параметри в точці $z = H, r = r_* = 0.120 \text{ м}$.

$$\psi_{1*H} = \frac{0.65}{2 \cdot 3.14} + \frac{0.35}{2 \cdot 3.14} \cdot 1 + 0.5805 \cdot 0.12 \cdot 0 = 0.1592 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$V_{\varphi*H} = \frac{\pi \cdot r_* \cdot C_0 \cdot \psi_{1*H}}{2L_3} = \frac{3.14 \cdot 0.120 \cdot 859.53 \cdot 0.1592}{2 \cdot 1.00} = 25.78 \text{ м/с}.$$

$$V_{\varphi*сеп.} = \frac{V_{\varphi*H} + V_{\varphi*0}}{2} = \frac{25.78 + 16.76}{2} = 21.27 \text{ м/с}.$$

Функція току і тангенціальна швидкість на стінці сепараційної камери апарата $z = 0, r = r_a = 0.200 \text{ м}, H = 0.8 \text{ м}$.

$$\begin{aligned}\psi_{1a0} &= \frac{L_1^1}{2\pi} + \frac{L_2^1}{2\pi} [1+1] + A \cdot r_* [0 + (-H)] = \\ &= \frac{0.65}{2 \cdot 3.14} + \frac{0.35}{2 \cdot 3.14} \cdot (1+1) + 0.5805 \cdot 0.12 \cdot (-0.8) = 0.1513 \text{ м}^3 / \text{с}. \\ V_{a0} &= \frac{\pi \cdot r_a^2 \cdot C_0 \cdot \psi_{1a0}}{2L_3 r_a} = \frac{3.14 \cdot 0.2^2 \cdot 859.53 \cdot 0.1513}{2 \cdot 1.00 \cdot 0.2} = 40.83 \text{ м/с}.\end{aligned}$$

Тіж самі параметри в точці $z = H, r = r_a = 0.200 \text{ м}$:

$$\begin{aligned}\psi_{1aH} &= \frac{L_1^1}{2\pi} + \frac{L_2^1}{2\pi} [1+1] + A \cdot r_* [-1 \cdot 0.8 + 0] = \frac{0.65}{6.28} + \frac{0.35}{6.28} + 0.5805 \cdot 0.12 \cdot (-0.8) = 0.1083 \text{ м}^3 / \text{с}, \\ V_{1a0} &= 40.83 \text{ м/с}; \quad V_{1acce.} = 40.83 \text{ м/с}.\end{aligned}$$

Загальний опір апарата на вході :

$$\begin{aligned}\Delta P_{ex} &= \frac{\rho}{2} \left(\frac{V_a^2 \cdot r_a}{r_4} - \frac{V_1^2 \cdot r_4}{r_a} + V_4^2 \right) = \frac{1.21}{2} \left(\frac{40.83^2 \cdot 0.200}{0.120} - \frac{21.27^2 \cdot 0.120}{0.200} + 21.27^2 \right) = \\ &= 1802,6 \text{ Па}.\end{aligned}$$

Загальний опір апарата на виході :

$$\Delta P_{вих} = \frac{\rho}{2} \cdot V_4^2 \left[k \left(\frac{V_{\varphi 4}}{V_{z4}} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{V_{\varphi 4}}{V_{z4}} \right)^2 \right] = \frac{1.21}{2} \cdot 21.27^2 \left[4.4 \left(\frac{21.27}{22.16} \right)^{\frac{4}{3}} + \left(\frac{21.27}{22.16} \right)^2 \right] = 1392,3 \text{ Па}.$$

Загальний опір апарата від потоку, що проходить по первинному каналу :

$$\Delta P_1 = \Delta P_{ex.} + \Delta P_{вих.} = 1802,6 + 1392,3 = 3195 \text{ Па}.$$

Коефіцієнт гідравлічного опору первинного каналу :

$$\xi_{01} = \frac{2\Delta P_1}{\rho \cdot v_a^2} = \frac{2 \cdot 3195}{1.21 \cdot 7.96^2} = 83,35.$$

Гідравлічний опір апарата моделі ВАЗЗПЦ-400.

Кратність потоків, що відповідає мінімуму гідравлічних втрат ΔP :

$$K^* = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\xi_2}{\xi_1}} \right)} = \frac{1}{\left(1 + \sqrt{\frac{83,35}{37,97}} \right)} = 0,403.$$

Тут :

$$\varepsilon = \frac{L_2}{L_1} = \frac{0.80}{0.20} = 4 - \text{співвідношення витрат вторинного та первинного}$$

потоків ;

$$K = \frac{L_2}{L_3} = \frac{0.80}{1.00} = 0.8 - \text{кратність потоків.}$$

Мінімальне значення коефіцієнта гідравлічного опору :

$$\xi^* = \frac{\xi_1}{\left(1 + \sqrt{\frac{\xi_1}{\xi_2}}\right)^2} = \frac{37.97}{\left(1 + \sqrt{\frac{37.97}{83.35}}\right)^2} = 13.53.$$

Фактичний коефіцієнт гідравлічного опору :

$$\xi = \xi^* \left(\frac{K}{K^*}\right) = 13.53 \cdot \left(\frac{0.8}{0.403}\right) = 26.86.$$

Теоретичний опір апарата :

$$\Delta P_a = \xi \cdot \rho_z \cdot \frac{V_a^2}{2} = 26.86 \cdot 1,21 \cdot \frac{7.96^2}{2} = 1030 \text{ Па} = 105 \text{ мм вод.ст.}$$

Теоретичне питоме енергоспоживання :

$$E = \frac{\Delta P_a}{3600} = \frac{1030}{3600} = 0.2861 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ м}^3$$

Дійсний коефіцієнт опору моделі ВА33ПЦ-400 $\xi_{400} = 48$. (без внутрішніх пристроїв) при витраті повітря $L_3 = 3600 \text{ м}^3 / \text{год}$ і кратності потоків $K = 0.8$:

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_z \cdot \frac{v^2}{2} = 48 \cdot 1,21 \cdot \frac{7.96^2}{2} = 1840 \text{ Па} = 187,6 \text{ мм вод.ст.}$$

Дійсні питомі енергетичні витрати апарата :

$$E = \frac{\Delta P_a}{3600} = \frac{1840}{3600} = 0.511 \text{ кВт} \cdot \text{год} / 1000 \text{ м}^3.$$

В таблиці А.2 надані порівнювані дані з аеродинамічних характеристик моделі ВА33ПЦ-400, отримані теоретичним шляхом, з експериментальними.

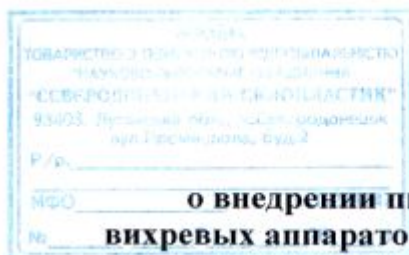
Таблиця А.2

Порівнювані дані теоретичних розрахунків з експериментальними

Позначення параметру	Одиниця вимірювання	Теоретичні дані	Експериментальні дані	Відхилення, %
L	м ³ /с	1.000	0.9764	2,42
L ₁	м ³ /с	0.200	0.19528	2.42
L ₂	м ³ /с	0.800	0.78112	2.42
v _a	м/с	7.96	7.77	2.45
ΔP _a	Па	1030	1697	60.7
ΔP ₁	Па	3195	4415	38,0
ΔP ₂	Па	1456	2011	27.6
ξ _a	-	26.86	48	56.0
ξ ₁	-	37.97	27.56	37.8
ξ ₂	-	83.35	38.62	216
E	кВт·год/1000 м ³	0.2861	0.4714	60.7

Як видно з таблиці А.2, порівнювані дані, отримані для одного типорозміру вихрового апарата з діаметром сепараційної камери $D_a = 400$ мм при максимальній продуктивності і кратності потоків $K = 0.8$ (режим максимального пиловловлювання), з деяких показників мають дуже великий розкид. Так, рівень втрат з загального гідравлічного опору ΔP_a , визначений теоретично, менше майже на 60 відсотків від дійсного, як і питома енергоспоживання E . Значно відрізняються між собою також і порівнювані коефіцієнти гідравлічного опору входних каналів апарата моделі ВА33ПЦ–400.

ДОДАТОК Б



АКТ

о внедрении пылеулавливающих установок на базе
вихревых аппаратов со встречными закрученными потоками

На промплощадке ООО «НПО» Северодонецкий Стеклопластик» в отделении шихтоподготовки цеха 6 производства стеклосфер на линиях доломита и мела реконструированы существующие аспирационные установки, не обеспечивающие санитарных норм выброса пыли в атмосферу.

На линии доломита (В-3, В-8) была смонтирована компактная двухступенчатая установка «ВАЗПЦ400-150х6» (первая ступень очистки – аппарат с диаметром сепарационной камеры 400 мм, вторая – 6 элементов диаметром 150 мм). На линии мела (В-10) - групповая установка «ВАЗПЦ300х3» (три аппарата диаметром 300 мм).

Характеристика внедрённых установок

Параметр	Единица измерения	Линия	
		доломита	мела
Входная концентрация пыли	мг/м ³	62000	3200
Выходная концентрация пыли	мг/м ³	760	330
Остаточный выброс	г/с	0,602	0,545
Общий расход очищаемого воздуха	м ³ /ч	5700	2425
Гидравлические потери	Па	1520	850
Удельные энергозатраты	кВт·ч/1000 м ³	0,422	0,236
Эффективность пылеулавливания	%	98,7	89,6

Сравнительная характеристика аспирационных систем

Тип аспирационной установки	Пропускная способность, м ³ /ч	Перепад давления, Па	Запылённость, г/м ³		Эффективность очистки, %	Удельные энергозатраты кВт·ч/1000 м
			вход	выход		
ЦН-15-650х1	2400	305	11,5	1,75	84,8	0,085
ВАЗПЦ400-150х6	2850	1520	11,5	0,21	98,7	0,422
ЦН-15-600х2	4500	300	3,5	0,932	74,0	0,082
ВАЗП300х3	4850	850	3,5	0,311	89,0	0,236

Техническая документация разработана в соответствии с патентами Украины №№ 80028, 81163.

Замена циклонов типа ЦН-15 аспирационными установками на базе модели ВАВЗПЦ позволила снизить хвостовые выбросы в атмосферу и вернуть в технологический цикл ценное сырьё.

Главный механик ООО «НПО
«Северодонецкий Стеклопластик»

Яровой Е. В.

ДОДАТОК В



Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственная фирма "Микрохим"
93009, Украина, Луганская обл., г. Рубежное, ул. Ленина, 33, тел. (06453)7-33-00, 7-66-07,
тел./факс: (06453)5-44-00

Иск. № *А78-06/13*

Дата: *14.06.2013*

АКТ

**о внедрении вихревых пылеуловителей
со встречными закрученными потоками**

В производственном корпусе ООО НПФ «МИКРОХИМ» производства лекарственного средства «Изосорбида динитрат разбавленный», порошок (субстанция), регистрационное удостоверение Министерства здравоохранения Украины № UA/4632/01/01 от 21.06.2011г., на линии сушки и подготовки к упаковке, с помощью специальной мобильной установки были проведены предварительные испытания по улавливанию товарных пылевых фракций субстанции «Изосорбида динитрат разбавленный».

После серии предварительных испытаний и обработки полученных результатов, в соответствии с технической документацией, разработанной инженером по наладке и испытаниям технологий ЧАО «Северодонецкий «ОРГХИМ» Галичем Р.В., была изготовлена и внедрена в технологическую схему аспирационная установка, включающая два одиночных вихревых аппарата модели ВЗПЦ-150М и ВЗПЦ-200М (с винтовой конической сепарационной камерой непрерывного удаления улавливаемого продукта и предварительной его выгрузкой через входные каналы – согласно заявке на полезную модель № и 2012 13437 от 26.11.2012 г.).

Новая пылеулавливающая система, средняя эффективность очистки аспирационного воздуха которой за шесть месяцев эксплуатации составила не менее 95,2%, позволила значительно снизить потери целевого продукта и обеспечить требуемые санитарные нормы на рабочих местах производственного помещения.

Директор ООО НПФ «МИКРОХИМ»



М.А.Бренер

ДОДАТОК Г

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор ООО «Рубежное-Агро»

Балабанов И. В.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

пылеуловителя со встречными закрученными потоками

Мы, нижеподписавшиеся, Генеральный директор ООО «Рубежное-Агро» Балабанов И.В. с одной стороны, и инженер ЧАО «Северодонецкий «ОРГХИМ» Галич Р.В. с другой стороны, составили настоящий акт о том, что нами был предварительно опробован и по результатам испытаний включён в технологическую линию вихревой пылеуловитель со встречными закрученными потоками модели ВАВЗПЦ-200 (винтовая сепарационная камера с непрерывной выгрузкой пыли, диаметр корпуса $D_k=200$ мм), предназначенный для предварительной очистки зерна от пыли на выходе из сепаратора «БСХ-700».

Эффективность очистки аспирационного воздуха составила 98,2%, что позволило снизить среднесуточную концентрацию выбрасываемой в окружающую среду пыли с 45 до 9,5 г/м³.


Пылеуловитель ВАВЗПЦ-200 установлен вместо циклона типа ЦН-15У диаметром 350 мм.

Достигнут социальный эффект за счёт уменьшения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Работа выполнена из материалов ООО «Рубежное-Агро» силами исполнителя.

Подписи:

от ООО «Рубежное-Агро»

 / Балабанов И. В. /

от ЧАО «Северодонецкий
«ОРГХИМ»

 / Галич Р. В. /