

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет природоохоронний
Кафедра загальної та теоретичної фізики

Бакалаврська кваліфікаційна робота

на тему: Моделювання технологічних процесів очистки газу
дисперсних потоків

Виконав студент 4 року навчання
групи ПЕ-44 (радіо)
Напряму підготовки 6.040106
«Екологія, охорона навколишнього
середовища та збалансоване
природокористування»
Бобик Вадим Олексійович

Керівник к.ф. – м.н., доцент
Курятников Владислав
Володимирович

Рецензент доктор тех.наук проф.
Софронков Олександр Наумович

Одеса 2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет _____природоохоронний_____

Кафедра _____загальної та теоретичної фізики_____

Рівень вищої освіти бакалавр

Спеціальність _____ Напрямок підготовки 6.040106 «Екологія, охорона
навколишнього середовища та збалансоване природокористування» _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри загальної та
теоретичної фізики Герасимов О.І.**

“18” _____травня_____2019__року

З А В Д А Н Н Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____Бобику Вадиму Олексійовичу_____

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання технологічних процесів очистки газо
дисперсних потоків _____

керівник роботи _____Курятников Владислав Володимирович к.ф-м.н, доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “_7_” грудня__2018__ року
№_343 – «С»__

2. Строк подання студентом роботи_____08.06.2019р._____

3. Вихідні дані до роботи_____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити)_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Немає		

7. Дата видачі завдання _____ 18.04.2019 р. _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Оцінка виконання етапу	
			у %	за 4-х бальною шкалою
1	Огляд новітніх літературних джерел за темою дипломного проекту	18.04.19 –	70	3
		29.04.19		
2	Узагальнення основних теоретичних положень проекту	30.04.19 -	70	3
		12.05.19		
3	Рубіжна атестація	13.05.19-	70	3
		19.05.19		
4	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення електронної версії роботи. Перевірка на плагіат. Складання протоколу та авторського договору	27.05.19 -	70	3
		04.06.19		
5	Підготовка паперової версії і презентаційного матеріалу до процедури предзахисту. Внесення коректив. Рецензування роботи. Підготовка до публічного захисту.	05.06.19	70	3
		08.06.19		
	Інтегральна оцінка виконання етапів календарного плану (як середня по етапам)		70	3

Студент _____ **Бобик В.О.** _____
 (підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ **Курятников В.В.** _____
 (підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

«Моделювання технологічних процесів очистки газо дисперсних потоків»

Мета кваліфікаційної бакалаврської роботи – ознайомитися з існуючими методами і засобами очищення від дисперсної складової двофазних пилогазових або пилоповітряних потоків..

Задачею бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

– Вивчити існуючі методи моделювання цих потоків стосовно відомим технологіям очищення пилогазових сумішей.;

– розглянути питання про вплив поля віброприскорень частинок гранульованої системи на характеристики ступеня очищення дисперсних газових потоків;

– зробити наближені теоретичні оцінки ефективності очищення пилогазових потоків за допомогою гранульованих систем;

Ключові слова: дисперсна фаза, фільтрування, пористе середовище, гранульований матеріал, суцільне середовище .

Науковий керівник: к.ф-м.н, доц. Курятников В.В.

Робота містить:

Сторінок – 31;

Рисунків – 1;

Таблиць – 1;

Літературних посилань – 11.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 Властивості дисперсних двофазних пилогазових систем	10
2 Моделювання газодисперсного потоків в процесі осадження частинок	12
3 Фільтрування дисперсної фази	14
4 Фільтрування газодисперсного потоку в шарі гранульованого матеріалу	17
5 Моделювання механізмів фільтрування газодисперсного потоку в шарі гранульованого матеріалу	19
ВИСНОВКИ	31
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	29

ВСТУП

Актуальність досліджень. Найбільший прогрес у вивченні [1,6,9] методів і способів очищення пилогазових потоків в СРСР і за кордоном припадає на середину 20-го століття, що зумовлено бурхливим зростанням промислового виробництва. З розвитком і вдосконаленням нових технологій з'являються можливості підвищення ефективності очищення промислових пилогазових потоків. Останні досягнення в області вивчення нових матеріалів, гранульованих систем дозволяють сподіватися на успіхи робіт по установці нових очисних систем, що працюють за новими більш досконалими технологіям. Це стосується, наприклад, металургійних і енергетичних підприємств, підприємств ЯПЦ, підприємств коксохімічної промисловості, де пилогазові потоки нагріті до високих температур і використання старих матеріалів (полімерних, тканинних) всгда проблематично.

Мета роботи - ознайомитися з існуючими методами і засобами очищення від дисперсної складової двофазних пилогазових або пилоповітряних потоків. Вивчити існуючі методи моделювання цих потоків стосовно відомим технологіям очищення пилогазових сумішей.

Постановка задачі

На підставі загальних законів фільтрації двофазних пилогазових сумішей розглянути можливі механізми процесів осадження дисперсних частинок при проходженні двофазних потоків через шар гранульованого матеріалу з розмірами гранул 1-5 мм.

Виділивши основні можливі механізми процесів осадження дисперсних частинок при проходженні через гранульовану систему, уявити фізичну модель процесів, що відбуваються.

Використовуючи загальні методи моделювання, зробити наближені теоретичні оцінки ефективності очищення пилогазових потоків за допомогою гранульованих систем.

Розглянути питання про вплив поля віброприскорень частинок гранульованої системи на характеристики ступеня очищення дисперсних газових потоків.

Сформулювати загальні висновки, що стосуються застосування гранульованих матеріалів для фільтрування газодисперсного потоків і моделювання цього процесу.

1 ВЛАСТИВОСТІ ДИСПЕРСНИХ ДВОФАЗНИХ ПИЛОГАЗОВИХ СИСТЕМ

Ці системи являють собою середовище, в якій несучої складової є газ, зокрема, повітря, а дисперсною фазою - тверді або рідкі частинки.

Коли дисперсна фаза являє собою тверді частинки, то система носить назву газовзвесь. Якщо дисперсна фаза являє собою краплі рідини в повітрі, то таку систему називають аерозоль.

Найдрібніші (тонкі) частки за розмірами близькі до великих молекул, а для найбільш великих найбільший розмір визначається їх здатністю більш-менш тривалий час перебувати в підвішеному стані.

Зазвичай мова йде про частки розміром до 100 ... 200 мкм, а за деякими уявленнями до 500 мкм.

Сукупність усіх фракцій аерозолю називають фракційним складом його дисперсної фази, яку можна представляти графічно. Відкладаючи по осі абсцис значення інтервалів, що відповідають розмірам дисперсних частинок, а по осі ординат - процентні змісту частинок відповідних фракцій, отримують ступінчасті графіки фракційного складу - гістограми.

Зі зменшенням інтервалів фракцій гістограми наближаються до плавним кривим, які називаються кривими функцій розподілу або, просто - кривими розподілу.

У багатьох випадках такі криві бувають близькі за своєю формою до кривої нормального розподілу випадкових величин (Гаусса). Розподілу зазвичай описуються двома параметрами - середнім діаметром частинок D_m і стандартним відхиленням (дисперсією) σ від нього.

Так як частинки дисперсної фази рідко бувають сферична, то в якості характерного розміру часток користуються поняттям розміру, еквівалентного діаметру подібної сферичної частинки, званого медіанного діаметром.

Теоретично в роботах математичної школи академіка Колмогорова обґрунтовано, що дисперсність пилу, що утворюється при подрібненні

матеріалу протягом тривалого часу, підпорядковується логарифмічно нормальному закону розподілу.

Розподіл часток в реальних дисперсних система може бути приведено за формою до нормального, якщо на графіках по осі абсцис замість розмірів частинок відкласти значення їх логарифмів.

У таких випадках можна вважати, що розміри частинок твердої фази розподілені по логарифмічно нормальному закону.

Криву логарифмічно нормального розподілу також можна задати двома параметрами - логарифмами середнього діаметра і стандартного відхилення від нього:

Інтегральні криві нормального і логарифмічно нормального розподілів мають форму інтеграла ймовірностей, що дозволяє використовувати таблиці його значень в розрахунках, пов'язаних з розподілом часток аерозолі за розмірами.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКІВ В ПРОЦЕСІ ОСАДЖЕННЯ ЧАСТИНОК

Осадження частинок з газової фази може відбуватися різними способами, які покладені в основу принципу роботи відомих очисних апаратів і обладнання [1- 9]. Перерахуємо їх:

- гравітаційне осадження (падіння частинок під дією сили тяжіння);
- інерційний осадження, при якому рухомі в потоці частки внаслідок великої інерції не йдуть за потоком, а зберігаючи початковий напрямок руху, рухаються під кутом до потоку і осідають на стінках, перегородках, сітках і ін. Елементах очисного пристрою (каналу, сепаратора, циклону,);
- фільтрування, яке полягає в проходженні пилогазового потоку через фільтрувальні перегородки, що допускають проходження повітря, але затримують дисперсні частинки;
- мокра газоочищення (скрубери), при якій відбувається злиття дисперсної фази з крапельками орошувальної рідини;
- електроочістка пилогазових потоків за допомогою електрофільтрів.

Механіка суцільних середовищ дає рівняння руху, що описують траєкторії руху частинок в газовому потоці.

При сталому перебігу, коли газовий потік рухається стаціонарно, а частка настільки мала, що для сили опору середовища F_c застосуємо закон Стокса, то з рівняння руху частинки в газовому потоці з урахуванням поправки Кенінгема після ряду спрощень можна отримати критерій Стокса або «інерційний параметр»:

$$Stk = \frac{v_0 \rho_g d_p^2 C_k}{18 \mu_0 2R} , \quad (2.1)$$

де d_p - діаметр частинки, м; τ - час руху, с; W_0 , v_0 - вектор швидкості частинки, м / с; μ_0 - в'язкість.

Цей критерій характеризує ставлення інерційної сили, що діє на дисперсну частку, до сили гідравлічного опору середовища.

Критерій чисельно дорівнює відношенню відстані, яку проходить часткою з початковою швидкістю $W_ч$ при відсутності зовнішніх сил до зупинки,

$$l_ч = \frac{d_ч^2 w_ч \rho_ч}{18 \mu_0} \quad (2.2)$$

до характерного розміру обтічного тіла (наприклад, діаметру кулі або циліндра).

Якщо рух частинки здійснюється в області, де закон Стокса непридатний, необхідно уцітиватьтношеніе справжню силу опору.

У цьому випадку критерій Рейнольдса для частки визначається виразом:

$$Re_ч = \frac{d \rho_0 (w_ч - v_0)}{\mu_0} \quad (2.3)$$

Критерій Stk є єдиним критерієм подібності інерційного осадження.

При $Stk = 0$ (у частинок з нескінченно малою масою) частка точно слід по лінії струму, не стикаючись з поверхнею обтічного тіла. Очевидно, таке ж явище буде спостерігатися і при досить малих значеннях критерію Стокса.

Існує певна мінімальна, так зване критичне значення числа Стокса $Stk_{кр}$, при якому інерція частки виявляється достатньою, щоб подолати захоплення її газовим потоком, і вона досягає поверхні тіла. Таким чином, захоплення частки тілом можливий за умови:

$$Stk > Stk_{кр}. \quad (2.4)$$

3 ФІЛЬТРУВАННЯ ДИСПЕРСНОЇ ФАЗИ

Найбільш ефективним способом тонкого очищення газів від частинок і крапель рідини є процес фільтрування. Фільтри дозволяють досягти значень 99,9% ефективності пиловловлювання. [9]

Суть процесу фільтрування полягає в пропущенні дисперсної середовища через фільтри, які допускають проходження повітря, але затримують дисперсні частинки.

У фільтр надходить забруднене газ, частинки домішок осідають на вхідній частині фільтра (фільтроелемента) і затримуються усередині поверхневого його, утворюючи на поверхні перегородки шар домішок.

Фільтрування запиленого потоку - це складний процес, що включає дію різноманітних фізичних процесів і ефектів: ситового ефекту, інерційного зіткнення, дії гравітаційних і електричних сил, броунівської дифузії, торкання (зачеплення).

Осадження частинок на зовнішній і внутрішній поверхнях фільтруючого елемента відбувається в результаті сукупної дії ефекту зачеплення, а також гравітаційного, дифузійного, і інерційного процесів.

При взаємодії дисперсної частинки з матеріалом фільтра діє одночасно кілька загальних механізмів, які можуть привести до її уловлювання:

- 1) дотик;
- 2) інерційний захоплення;
- 3) дифузія;
- 4) електростатичне осадження;
- 5) термофорез;
- 6) гравітаційне осадження;
- 7) ситової ефект.

Пил при фільтруванні тканинних фільтрах в основному затримується в результаті зіткнення частинок з елементами структури фільтра. У разі тканинних фільтрів такими елементами структури є волокна і нитки

фільтрувального матеріалу. При зіткненнях з ними відбуваються прилипання дисперсних частинок до волокон.

Інерція. Частка знаходиться на лінії струму, дотримуючись якої вона пройшла б повз перешкоди, не торкаючись його, але під дією інерції частка сходить з початкової лінії струму. В результаті вона стикається з перешкодою.

Чим більше частка, тим більше її інерція, краще умови для захоплення. При звичайних швидкостях течії в фільтрах цей механізм мало ефективний для частинок діаметром менше мікрометра.

Дотик. Частка рухається уздовж лінії струму газу до нитки або волокна (перешкоди). Якщо частинка рухається повз перешкоди на відстані менше свого радіусу, то вона стосується перешкоди і захоплюється.

Дифузія. Частка настільки мала, що її траєкторія стає хаотичною через броунівського руху. Захоплення може статися, якщо випадкове відхилення призводить частку до волокна. Цей механізм стає найбільш важливим, коли розмір частинок менше 0,1 мкм.

Електростатичне осадження. Частка і перешкоду мають заряди протилежних знаків, внаслідок чого частка притягається до перешкоди.

Термофорез. Частка зміщується до перешкоди під дією градієнта температури.

Гравітаційне осадження. Частка зміщується з лінії струму, що проходить повз перешкоди, до самої перешкоди під дією тяжіння між часткою і волокном або під дією земного тяжіння. Цей ефект дуже малий.

Ситовий ефект. Частка затримується через те, що занадто велика, щоб пройти через цю пору або канал. Можливості осадження за рахунок ситового ефекту, особливо при проходженні потоку через чисту тканину, обмежені, т. К. В більшості випадків розміри частинок значно менше розмірів пір.

Процес фільтрування в найбільш поширених волокнистих фільтрах можна уявити, як рух частинок поблизу ізольованого циліндра (з

волокнистого матеріалу), розташованого поперек потоку. Впливом сусідніх волокон нехтують.

Проходячи через фільтруючу перегородку, потік газу поділяється на тонкі безперервно роз'єднуються і зникаються цівки. Частинки, володіючи інерцією, прагнуть переміщатися прямолінійно, стикаються з волокнами, зернами і утримуються ними.

4 ФІЛЬТРУВАННЯ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКУ В ШАРІ ГРАНУЛЬОВАНОГО МАТЕРІАЛУ

Частинки газодисперсного потоків при фільтруванні в шарі гранульованого матеріалу затримується в результаті зіткнення їх з елементами структури фільтра, якими є гранули фільтрувального матеріалу[9]. Вибір розмірів і форми гранул, як і вибір матеріалу гранул суттєво пов'язаний з ефективністю роботи фільтра з урахуванням умов роботи фільтра.

Безсумнівно[9], що межі застосування фільтрів з гранульованим матеріалом набагато ширше в порівнянні з тканинними або ж полімерними фільтрами. Цьому сприяють такі чинники:

- теплові властивості гранульованого матеріалу, здатність витримувати високі температури конверторних, димових та інших газів промислових викидів;

- адгезійні властивості, які полягають в ширшій можливості вибору найбільш ефективного за своєю здатністю прилипання дисперсних частинок пилогазових потоків до гранул фільтра;

- адсорбційні властивості, що дозволяють проводити очищення пилогазоповітряних викидів не тільки від міститься в ній дисперсної фази, але і від шкідливої газової домішки, таких як оксиди сірки і азоту, що, як відомо[1,2,4-6], і використовується в коробках з вуглеграфітові порошком проти газів;

- можливість застосування і використання в якості фільтруючого матеріалу нових матеріалів з новими, відмінними адгезійними і адсорбційними властивостями, таких як графен[], який має не тільки виняткову адсорбційну здатність, але і інші важливі властивості, наприклад, здатність до дезактивації радіоактивної речовини;

- при збереженні загальних механізмів фільтрування, перерахованих вище (дотик, інерційний захоплення, дифузія, електростатичне осадження, термофорез, гравітаційне осадження, ситової ефект), з'являються нові механізми взаємодії, пов'язані з віброприскоренню гранульованого матеріалу фільтра, що дають можливість не тільки керувати процесом фільтрації, але і істотно підвищити ККД фільтрувальних пристроїв і ефективність процесу очищення пилогазових потоків;

- поле віброприскорень, прикладена до площини, на якій розміщується шар гранульованого матеріалу, дозволяє не тільки змінювати щільність упаковки гранульованого матеріалу, але і створювати так звані киплячі шари гранул, через які пропущатися забруднене дисперсною фазою газоповітряний потік.

Перераховані факти є переваги нової, сучасної технології, що пропонується очищення пилогазових викидів, що має відмінні якості:

- зміна щільності упаковки і створення киплячого шару в гранульованій системі повинно істотно зменшити гідравлічний опір фільтрувальних апаратів, яке в дійсній установках становить близько кількох кПа (до 3,5 кПа);

- зменшення гідравлічного опору пилогазового потоку дає можливість збільшити витрату прохідних через очищення потоків на десятки і сотні м / ч при одночасному підвищенні ефективності пилоочістки;

- застосування нових матеріалів в якості гранул фільтрувального елемента розширить можливості застосовуваного методу по тепловим і температурним навантаженням, по дезактиваційних і ін. Чинників.

Без сумніву[5-7], ці, на перший погляд, досить очевидні факти вимагають підтвержень у вигляді спочатку простих оцінок, що і є однією з мають важливе практичне значення цілей цієї роботи, проведення теоретичних розрахунків і експериментальне перевірки, а також циклу дослідно-експериментальних робіт на установках, подібних в промисловому виробництві.

5 МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЗМІВ ФІЛЬТРУВАННЯ ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКУ В ШАРІ ГРАНУЛЬОВАНОГО МАТЕРІАЛУ

Уявімо модель фільтрувального елемента на основі гранульованого матеріалу у вигляді системи твердих кулястих частинок (гранул), що лежать багат шарово на платині, на яку з певною частотою і потужністю подаються вібрації. При наявності вібрацій гранули підстрибують вгору і падають вниз на пластину, створюючи так званий киплячий шар.

Процес фільтрування в фільтрах з гранульованими матеріалами уявімо, як рух частинок поблизу кулі (гранули), розташованого поперек потоку (рис.1.). Впливом сусідніх гранул нехтуємо.

Проходячи через фільтр, потік газу поділяється на тонкі безперервно цівки. Частинки, володіючи інерцією, прагнуть переміщатися прямолінійно, стикаються з гранулами і утримуються ними.

При обтіканні твердої гранци (кульки) запилених потоком дисперсні частинки внаслідок своєї більшої інерції продовжують рухатися поперек вигнутих ліній струму газів (рис.1) і осідають на поверхні твердої гранули внаслідок адгезійних ефектів. В результаті при зіткненнях дисперсних частинок з гранулами відбуваються прилипання цих частинок до гранул.

Вважаємо, що потік має безвихревое рух, а дисперсні частинки - сферичну форму. Частинки при зіткненнях з гранулами затримуються на їх поверхні силами міжмолекулярної взаємодії. Відстані між гранулами набагато більше в порівнянні з розмірами частинок (мінімум в 10 разів перевищують розміри частинок).

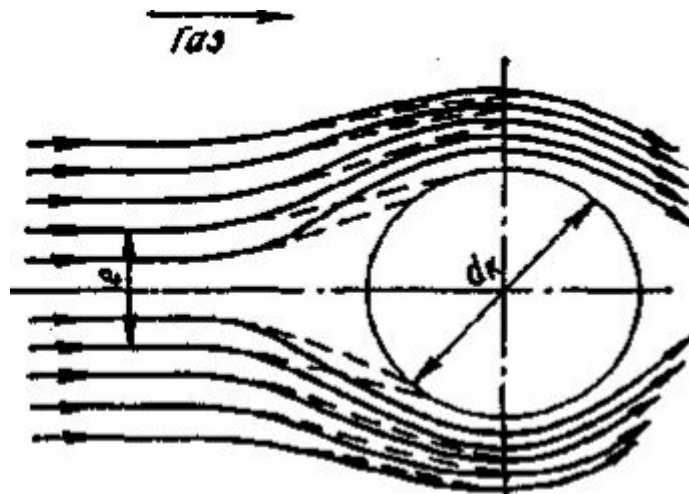


Рис. 1. Схема руху запиленого газу при обтіканні кулястої гранули.

----- траєкторії потоку;

- - - траєкторії центрів частинок пилу.

При русі потоку через фільтрувальний матеріал газ огинає гранули, більші частинки пилу під дією сил інерції зберігають колишнє прямолінійний напрямок руху і, стикаючись з гранулами, захоплюються і прилипають до них. Такий механізм характерний для захоплення великих частинок і проявляються сильніше при збільшенні швидкості фільтрування.

При зіткненні дисперсної частинки з окремою гранулою механізми торкання, інерції і дифузії, є основними і найбільш важливими механізмами. Гравітація і термофорез менш істотні, електричні сили можуть грати і незначну роль і дуже важливу. Ситовий ефект в разі гранульованої системи мало ймовірний.

У разі тканинних фільтрів значна частина процесу уловлювання дисперсної фази протікає в шарі осадження частинок на лобовій поверхні фільтра. Такі механізми, як дотик, інерція і дифузія, діють лише протягом невеликої частини всього циклу фільтрації. Як тільки після очищення фільтра утворюється нової шар осаду, домінуючим механізмом стає ситовий ефект.

У разі фільтрів на основі гранульованих матеріалів процес очищення, очевидно повинен проходити інакше. Процес фільтрації здійснюється у

всьому обсязі гранульованої системи за рахунок її перемішування в результаті подаються вібрацій. Вібрації, що подаються на підкладку, струшують не тільки всю гранульовану систему, але і той осад, який наростає в результаті роботи фільтра.

Цілком очевидно, що (і це спостерігається в досвіді при додаванні більш дрібних кульок до великих) виникає ефект так званої сегрегації. Ефект сегрегації сприяє відділенню осаду від гранул і виведенню його з фільтра.

Розмір гранул відіграє важливе значення при зіткненні і захопленні частинок за рахунок торкання ними поверхні обтічних гранул. Якщо знехтувати інерційними ефектами і вважати, що частка точно слід уздовж лінії струму, то частка осідає не тільки в тому випадку, коли її траєкторія перетнеться з поверхнею гранули, але і в разі руху по лінії струму на відстані від поверхні тіла, що дорівнює її радіусу. В цьому випадку працює ефект Магнуса в механіці аеродисперсних систем, вивчений в працях школи проф. В.А.Федосеева в 1960-1980 рр. Таким чином, ефективність зачеплення може бути вище нуля і тоді, коли інерційне осадження відсутня. Ефект зачеплення характеризується параметром R , який являє собою відношення діаметрів частинки d ч і обтічного тіла d_t [2]:

$$R = d/d_t. \quad (5.1)$$

При потенційному обтіканні кулі, коли величина R настільки мала, що можна знехтувати інерційними ефектами, ефективність зачеплення кулястої гранулою становить:

$$\eta_R = (1 + R^2) - \frac{1}{1 + R} \approx 3R$$

У цьому ж випадку для циліндра правильне співвідношення:

$$\eta_R = (1 + R) - \frac{1}{1 + R} \approx 2R$$

В іншому граничному випадку, коли за рахунок великого значення інерційних ефектів траєкторії осідають частинок прямолінійні, маємо наступні співвідношення:

для кулі

$$\eta R = (R + 1)^2 - 1 \approx 2R, \quad (5.2)$$

для циліндра

$$\eta R = R. \quad (5.3)$$

Таким чином, при потенційному обтіканні кулі ефективність механізму зачеплення знаходиться в межах $2R \dots 3R$, а при потенційному обтіканні циліндра $R \dots 2R$, тобто при обтіканні кулястих гранул ефективність уловлювання пилу за рахунок ефекту зачеплення завжди більше, ніж при обтіканні циліндричних волокон тканинних, полімерних і стекловолнокових фільтрів.

Коефіцієнт ефективності інерційного осадження визначається часткою частинок, що покинули потік при зміні їм напрямки внаслідок обтікання їм різного роду перешкод.

При обтіканні кульової гранули пилогазовим потоком з великою швидкістю траєкторії руху газу і пилових частинок розходяться внаслідок різної величини сил інерції, що діють на газ і на частинки з різною масою. Великі частинки в меншій мірі, ніж газ, змінюють свій напрямок при підході до краплі і осідають на ній (рис.1). Пояснюється цей, що в цих випадках розглядається двофазний потік і діють сили інерції.

Дрібні частинки, слідуючи разом з газом, огинають краплю і йдуть з потоком газу. У цих частинок інерція недостатня для подолання опору газу.

Ефективність інерційного осадження пилових частинок на гранулі залежить від критерію Стокса. Дія сил інерції реально проявляється у ставленні частинок діаметром понад 1 мкм.

Для кульових частинок пилу розміром $d \ll d_k$ ефективність інерційного осадження на гранулах може бути виражена залежністю

$$\varepsilon_i = f(d \ll d_k \nu_0 \rho_0 / 18 \mu_0 d_k), \quad (5.4)$$

де ν_0 - швидкість потоку, м / с; μ_0 - динамічна в'язкість газу, Па.с; d_k - діаметр крапель, м.

При значенні $St_k \geq 0,1$ ефективність осадження на краплях можна визначити за емпіричною формулою:

$$\varepsilon = Stk / (Stk + 0,125). \quad (5.5)$$

Крім інерційного осадження, на краплях має місце осадження дифузионное, а також під дією електростатичних сил. Однак роль їх в порівнянні з інерційним осадженням дуже незначна, а для частинок більше 0,2 мкм може не враховуватися.

Частинки малих розмірів (менш 0,1 мкм) можуть бути чутливими до броунівського (теплого) руху молекул. Переміщення частинок в цьому випадку описується рівнянням Ейнштейна.

Для визначення ефективності осадження частинок за рахунок торкання при в'язкому обтіканні циліндра справедливі наступні рівняння:

$$\eta_R = \frac{R^2}{1 - \ln Re_T}, \quad (5.6)$$

$$\eta_R = R^2 Re_T^{0,0625}, \quad (5.7)$$

де

$$Re_T = \frac{d_T v_0 \rho_0}{\mu_0} \quad (5.8)$$

- критерій Рейнольдса для обтічного тіла.

З наведених вище рівнянь слід, що ефект зачеплення стає значним при осадженні частинок на сферах з малим діаметром.

Чисельні оцінки показують, що осадження частинок за рахунок ефекту зачеплення не залежить від швидкості газів, але в значній мірі визначається режимом течії газового потоку.

Зіткнення частинок пилу з гранулами фільтрувального матеріалу в результаті дії сил інерції, очевидно, є функцією критерію Стокса (2.1)

$$Stk = \frac{v_0 \rho_p d_p^2 C_k}{18 \mu_0 2R},$$

де - діаметр частинок пилу, м; - щільність частинок, кг / м³; - діаметр гранули, м; v - швидкість газового потоку, м / с; - динамічна в'язкість газу, Па с; C_k -

поправка Кенінгема, вводиться для частинок діаметром порядку довжини середнього вільного пробігу молекул газу.

Ефективність осадження частинок на обтічному тілі зачепленням може бути представлена і в критеріальною формі з використанням критерію Стокса і критерію Рейнольдса

$$\frac{Stk}{Re_T} = \frac{d_4^2 \rho_4}{d_T^2 \rho_0} = const, \quad (5.9)$$

Чим більше Stk , тим більше число зіткнень частинок з поверхнею гранул фільтрувального матеріалу.

Дрібні дисперсні частинки, що володіють малою інерцією, можуть разом з газовим потоком обігнати гранулу. Найдрібніші частинки можуть зіткнутися з нею, беручи участь в броунівському русі, і пристане до її поверхні.

Розглянемо ефективність механізму дифузійного осадження.

Якщо розмір дисперсних частинок дуже малий, випадкове відхилення від лінії струму за рахунок теплового броунівського руху призводить частку до зіткнення з гранулою.

Ефективний коефіцієнт, умовно введений для характеристики цього процесу, названий коефіцієнтом дифузії.

При справедливості закону Стокса, коли розмір частинок більше середнього шляху пробігу молекул, коефіцієнт дифузії частинок можна виразити як функцію розміру часток:

$$D_q = \frac{C_K k_B T_g}{3\pi\mu_0 d_q}, \quad (5.10)$$

де T_g - абсолютна температура газу, К; k_B - постійна Больцмана.

При $d_q < \lambda$ коефіцієнт дифузії може бути розрахований за рівнянням, запропонованим Ленгмюром:

$$D_q = \frac{4k_B T_g}{3\pi d_q^2 \rho_g} \left(\frac{8R_g T_g}{\pi M_g} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.11)$$

де ρ_g - абсолютна тиск (Па), універсальна газова постійна R_g / (кмоль К); молекулярна вага газу, кмоль.

Коефіцієнт дифузії D входить в безрозмірний комплекс, характеризує відношення сил внутрішнього тертя до дифузійним силам.

Цей комплекс отримав назву критерію Шмідта Sc , іноді званого дифузійним критерієм PrD :

$$Sc = \frac{\mu_0}{\rho_0 D_q} \quad (5.12)$$

Другим критерієм, використовуваним в практиці дифузійних розрахунків, є критерій Пеклі Pe , що є відношенням конвективних сил до дифузійним силам:

$$Pe = Re \cdot Sc = \frac{v_0 \rho_0 l}{\mu_0} \cdot \frac{\mu_0}{\rho_0 D_q} = \frac{v_0 l}{D_q}, \quad (5.13)$$

де l - визначальний лінійний параметр обтічного тіла.

Величина, зворотна критерієм Pe , є параметром дифузійного осадження і позначається через D .

Нижче наведені (табл. 5.1) значення коефіцієнта дифузії частинок, розраховані для повітря при нормальних умовах, і значення критерію Sc :

Таблиця 5.1 - Значення коефіцієнта дифузії частинок і критерію Шмідта від розміру часток аерозолію.

Розмір частинок, мкм	10	1,0	0,1
Коефіцієнт дифузії	$2,4 \cdot 10^{-12}$	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$61 \cdot 10^{-10}$
Критерій Sc	$6,4 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^4$

Як видно з наведених даних, коефіцієнт дифузії різко збільшується зі зменшенням розміру частинок. Однак швидкість дифузії навіть субмікронних частинок дуже мала в порівнянні зі швидкістю дифузії молекул газів, оскільки коефіцієнт дифузії частинок на кілька порядків менше.

Для розрахунку ефективності дифузійного осадження частинок при обтіканні газовим потоком кулі справедливо вираз:

$$\eta D = 2\sqrt{2} / (Pe \, d\chi)^{\frac{1}{2}}. \quad (5.14)$$

Рівняння для розрахунку ефективності дифузійного осадження на циліндрі при в'язкому його обтіканні має вигляд:

$$\eta_D = 2,92(2 - \ln Re_N)^{-1/3} Pe^{-2/3}, \quad (5.15)$$

а при потенційному осадженні

$$\eta D = 3,19 Pe^{-1/2}. \quad (5.16)$$

Згідно вищенаведеним рівнянням, ефективність дифузійного осадження обернено пропорційна розмірам частинок і швидкості газового потоку.

При кожній апаратній механізмі уловлювання частки відділяються від газу завдяки: гравітаційної седиментації, відцентровому осадження, інерції і торкання, броунівський дифузії, термофорез, диффузіофорезу, електростатичного осадження.

Швидкість осадження може бути збільшена завдяки укрупненню часток внаслідок агломерації і конденсаційного росту.

Може бути визначена ефективність осадження при броунівському русі і під дією електричних сил як частина загальної ефективності.

Ефективність осадження, $\varepsilon\delta$, часток поодинокими гранулами при броунівському русі (температура потоку нижче 100 ° C) може бути визначена за наближеною формулою:

$$\varepsilon\delta = 1,35 \cdot 10^{-2} / (v_0 \, d\chi \, d\Gamma), \quad (5.17)$$

$$\varepsilon_\delta = 1,35 \cdot 10^{-2} / (v_0 \, d_\chi \, d_\Gamma)^{\frac{1}{2}}, \quad (5.18)$$

де v_0 - швидкість газового потоку, м / с; $d\chi$ - діаметр частинок пилу, мкм; $d\Gamma$ - діаметр гранули, м.

На шляху руху дисперсної частинки запиленого потоку розташовано кілька рядів гранул, що, очевидно, значно підвищить ймовірність взаємодій частинки з гранулами і загальну ефективність осадження.

Електростатичний механізм захоплення пилинок проявляється, коли гранули будуть зарядженими або поляризовані зовнішнім електричним полем.

Певний вплив на процес фільтрації можуть мати електричні і магнітні сили, при особливому прояві електростатичного механізму захоплення пилинок в разі застосування діелектричних насипних гранульованих матеріалів.

Гідравлічний опір шару осілого пилу можна визначити за формулою козенят-Кармана (Па):

$$\Delta p = k_c \mu_0 v_0 G (1 - m_p) / (d m_p c), \quad (5.19)$$

де k_c - коефіцієнт, який приймається для пилу з діаметром частинок $d_c < 6$ мкм рівним 240; G - маса пилу, що міститься в порах фільтрувального матеріалу, віднесена до одиниці площі фільтра, кг / м²; m_p - пористість шару пилу, що дорівнює $m_p = (\rho_c - \rho_n) / \rho_c$, тут ρ_c - щільність частинок, кг / м³; ρ_n - щільність насипного шару, кг / м³; d_c - діаметр частинок пилу, м. Швидкість фільтрації $W = 1$ м / хв.

Гідравлічний опір шару осілого пилу товщиною 1 мм в залежності від дисперсного складу можна визначити за формулою (5.19). При осадженні тонких фракцій гідравлічний опір значно вище.

В реальних умовах процес осадження пилових частинок в фільтрах супроводжується коагуляцією часток, що також необхідно враховувати при розрахунках фільтрів. Через складність процесу практично неможливо визначити вплив всіх факторів на параметри фільтрації.

Тому, зазвичай при визначенні ефективності очищення і гідравлічного опору фільтра користуються даними, отриманими на основі узагальнення результатів експериментальних досліджень.

Теорія інерційного осадження не враховує осадження дисперсних частинок на задній поверхні обтічного тіла, яке може відбуватися за рахунок турбулентних пульсацій газового потоку. Це явище суттєво при уловлюванні субмікронних частинок пилу, тобто стає істотним при малих значеннях

критерію Stk . Тому навіть при $Stk < Stk_{кр}$ ефективність осадження не дорівнює нулю.

При ламінарному плинні потоку, коли $Re_{ч} < 2$, ефективність осадження не залежить від цього критерію, тому можна знехтувати існуванням прикордонного шару навколо обтічного тіла (в'язке обтікання).

Товщина прикордонного шару на поверхні обтічного тіла (гранули) при переході до турбулентного течією зменшується в міру зростання критерію $Re_{ч}$. При значеннях $Re_{ч}$ більше критичного ($Re_{ч} > 500$) лінії струму сильніше ізгібаються (потенційне обтікання) і обтікають тіло на більш близькій відстані від нього, внаслідок чого при тому ж значенні критерію Stk ефективність осадження буде вище.

Це зростання ефективності триває зі зменшенням товщини прикордонного (ламінарного) шару навколо тіла, тобто зі збільшенням критерію $Re_{ч}$. Таким чином, при потенційному обтіканні ефективність осадження залежить як від критерію Stk , так і від критерію $Re_{ч}$.

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто основні можливі механізми процесів осадження дисперсних частинок при проходженні через фільтр, виконаний на основі гранульованих матеріалів.

2. Розглянуто фізична модель механізмів процесів, що відбуваються при очищенні двофазних дисперсних потоків у фільтрах з використанням гранульованих матеріалів.

3. Відзначено, що межі застосування фільтрів з гранульованим матеріалом набагато ширше в порівнянні з тканинними або ж полімерними фільтрами. Цьому сприяють:

- теплові властивості гранульованого матеріалу (кераміки і металокераміки), здатність витримувати високі температури конверторних, димових та інших газів промислових викидів;

- можливість застосування і використання в якості фільтруючого матеріалу нових матеріалів з новими, відмінними адгезійними і адсорбційними властивостями, таких як графен, який має не тільки виняткову адсорбційну здатність, але і інші важливі властивості, наприклад, здатність до дезактивації радіоактивної речовини.

4. При кожній апаратній механізмі пиловловлювання на зовнішній і внутрішній поверхнях фільтруючого гранульованого елемента відбувається осадження частинок в результаті сукупної дії ефекту зачеплення дисперсних частинок, а також гравітаційного, дифузійного, і інерційного процесів; в поле віброприскорень дисперсні частинки відділяються від газу також завдяки броунівській дифузії, термофорезу, дифузіофорезу, електростатичного осадження.

5. Проведено моделювання механізмів осадження дисперсних частинок пилогазових викидів в фільтрі на основі гранульованих матеріалів за

допомогою відомої теорії подібності з використанням похідних від неї критеріїв і критеріальних співвідношень.

6. Проведено аналіз залежності ефективності пиловловлювання при основних механізмах осадження частинок в фільтрах на основі гранульованих матеріалів. Показано, що ефективність розглянутих фільтрів складається з парціальних ефективностей осадження різних механізмів в залежності від розмірів частинок вловлюється пилу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 210 с.
2. Курятников В.В. Конспект лекцій з дисципліни “Конструювання та інженерно-фізичні принципи захисту довкілля”, ОДЕКУ, Одеса, 2018, 50 с
3. Герасимов О.І. Теоретичні основи технологій захисту навколишнього середовища. ОДЕКУ, Одеса, ТЕС, 2018. 254 с.
4. Курятников В.В. Конспект лекцій з дисципліни “Інженерно-фізичні аспекти захисту навколишнього середовища”, Одеса, ОДЕКУ, 2017. 51 с
5. Герасимов О.І. Фізика гранульованих матеріалів. Монографія. Одеса: ТЕС, 2015. 264с.
6. Ветошкин А.Г. Таранцева К.Р. Технологии защиты окружающей среды. (Теоретические основы) Учебное пособие. Пенза, 2004, <http://window.edu.ru/resource/888/36888/files/stup114.pdf>
7. Герасимов.О.І.,Кільян.А.М. Элементы физики докiлля: Радиоекология Конспект лекцій. Одеса, ОДЕКУ, 2003 45 с.
8. Кузьмина Р.И. Техника защиты окружающей среды. Изд-во Саратовского университета, 2010 105 с.
9. Ратушняк У.С., Лялюк О.Г. Технічні засоби очищення газових викидів. Навчальний посiбник. Вінниця, ВНТУ, 2005 159 с
10. Герасимов О.І. Радиоекология за галузями. Підручник. ОДЕКУ. Одеса: ТЕС, 2016. 100 с.
11. Рыбаков Ю.С. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: конспект лекцій. Екатеринбург, 2005, 196с. Електронне - <http://www.twirpx.com/file/1472984/>