

## КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА РАДІОАПАРАТУРИ

УДК 658.283.71

Вікторія Батлук, Ростислав Яцюк  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра охорони праці

### НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ВІДЦЕНТРОВО-ІНЕРЦІЙНИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ З ЖАЛЮЗІЙНИМ ВІДОКРЕМЛЮВАЧЕМ В РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

© Батлук Вікторія, Яцюк Ростислав, 2003

**Наведено наукові основи процесу розділення гетерогенних систем шляхом дисипації багатомасштабних турбулентних вихорів, що дає можливість розрахувати конструктивні розміри принципово нових конструкцій пиловловлювачів.**

**The scientific bases process of division heterogeneous systems by dissipation is great-scale turbulention of whirlwinds are given, that enables to calculate the constructive sizes of essentially new designs dust-collectors.**

**Постановка проблеми.** У радіоелектронній промисловості існує цілий ряд виробництв, у результаті яких виділяється велика кількість шкідливих речовин у вигляді дрібно-дисперсних зважених твердих частинок. До таких виробництв належать процеси пайки, виробництво друкованих плат, заготівельні, фарбувальні, монтажні-складальні роботи тощо.

При виробництві радіоелектронних компонентів (мікросхем, транзисторів тощо) основним технологічним елементом є процес напилення на підкладку напівпровідникових складових, де ступінь очищення повітря відіграє вирішальну роль в забезпеченні якості виробів. З існуючих засобів очистки повітря від пилу у радіоелектронній промисловості надають перевагу сухим механічним методам очищення як таким, що не порушують протікання технологічного процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проаналізувавши існуючі рівняння траєкторій руху аерозолів в криволінійних каналах, можна констатувати, що ще не виведено диференціальних рівнянь, за якими можна вираховувати траєкторію руху певної частинки аерозолу в криволінійному каналі конкретної форми, задавши чіткі початкові умови\*.

Турбулентна двофазна течія являє собою складну систему, поведінка якої визначається взаємодією багатьох чинників. Важливо зазначити ще одну особливість, з якою пов'язане вивчення турбулентних гетерогенних потоків: розробка теорії турбулентного руху однофазного середовища далека від свого завершення. Проте практичні потреби, а також внутрішня логіка розвитку науки прискорили численні дослідження різних питань гідромеханіки та теплофізики турбулентних течій газосумішей. Тут потрібно згадати роботи Г.Н. Абрамовича, Ю.А. Буєвича, Т.А. Гиршович, З.Р. Горбіса, М.К. Лаатса,

---

\* Батлук В.А., Азарський К.І. Математичне забезпечення вибору оптимального обладнання для очистки повітря від пилу за допомогою комп'ютерної техніки // Український журнал медичної техніки і технології. – 2000. – № 2. – С. 92 – 94.

Е.П. Медникова, Ф.Е. Спокойного, Ф.А. Фрішмана, Н.А. Фукса, Бусройда, Корсина, Ламлі, Песькіна, Рікса, Сафмена, Соу, Фрідлендер, Хеєроні, Хинце, Чао, Чена, Ельхобаши та ін. Разом з тим, багато важливих аспектів проблеми вивчені недостатньо, в ряді випадків експериментальні дані суперечливі, а фізичні уявлення і моделі незадовільні. Так, наприклад, донедавна струйні двофазні течії розраховувалися переважно на основі різних модифікацій теорії шляху змішання Прандля, тобто з використанням моделей “нульового порядку”. Але дослідження пилогазового потоку в очисних апаратах висувають задачі більш детального опису явищ турбулентного перенесення в двофазному середовищі, що вимагає вивчення не тільки посередніх, але і пульсаційних характеристик потоку.

Рух зважених частинок в турбулентному потоці газу відрізняється набагато більшою, ніж в ламінарному потоці, складністю і інтенсивністю в повздовжньому і всіх інших напрямках. Це зумовлене тим, що частинки, якщо вони не дуже великі, реагують на безладні турбулентні пульсації середовища і разом з поступальним рухом з потоком здійснюють під їх впливом пульсаційний (коливальний) рух відносно молей газу, який їх переносить, а також безладне переміщення разом з молями газу, що називається турбулентною дифузією частинок.

Як і рух молей газу, пульсаційний і дифузійний рухи частинок мають стохастичний (випадковий) характер і тому описуються статистично. Той самий характер має і рух частинок під дією відцентрових сил і сил тяжіння в пилоочисних апаратах, здійснюючи разом з пульсаційними молями, що їх переносять, безладні падіння і підйоми.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Аналіз відомих методів сухого пилоочищення показує, що, незважаючи на високоефективне вловлення вискодисперсного пилу, вони не можуть забезпечити очищення дрібнодисперсної фракції вище за 85 %, а ряд конструктивних удосконалень веде до значного ускладнення схем пилоочищення.

Сьогодні не створена теорія процесу розділення гетерогенних систем, яка дала б можливість на її основі розробити принципово нові конструкції апаратів пилоочищення, які б змогли задовольнити потреби сучасного виробництва. Такі конструкції апаратів для очищення повітря від пилу реалізували б теорію руйнування турбулентних вихорів, згідно з якою тверді частинки мають можливість виділитися з пилогазового потоку і відбитися до зовнішньої стінки апарата. Основна задача на цьому етапі – звільнення частинок пилу від впливу вихору, що можливо тільки після його руйнування при зіткненні зі стінкою апарата. Цього також можна досягти завдяки виготовленню внутрішньої стінки апарату патрубного виходу чистого повітря не суцільною, а у вигляді жалюзійного відокремлювача. Для вирішення цієї проблеми необхідно створити математичну модель процесу сепарації в апаратах нового типу, в яких сумарний потік газу є потоком газу навколо вихрестоків зі спіральними лініями: стоку (логарифмічні спіралі) і є результатом накладання двох потоків: обертового руху в корпусі апарата (аналогічно циклонам) – плоский вихор, і руху повітря, яке відсмоктується через жалюзійний відокремлювач – плоский стік, за якою можна було б зв'язати траєкторії руху окремої матеріальної частинки в апараті з його ефективністю. Дослідження руху аерозолів в криволінійному каналі дозволяють виявити механізм руйнування вихорів, що дасть можливість сконструювати принципово нові пиловловлювачі, однією з основних відмінностей яких є наявність жалюзійного відокремлювача. Ввівши результати досліджень в банк даних ЕОМ, маючи тип пилу і його фізико-хімічні якості, можна вибрати найефективнішу конструкцію пиловловлювача для конкретних умов виробництва будівельних матеріалів та виробів.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** В умовах використання пиловловлювачів з жалюзійним відокремлювачем частинки пилу мають пульсаційний рух. Розглянемо пульсаційний рух, що здійснюється частинкою протягом одного періоду пульсації газу, уявивши зміну пульсаційної швидкості газу в часі моногармонічною функцією. У цьому випадку повздовжня ( $U_g$ ), поперечна ( $V_g$ ) і дотична ( $W_g$ ) складові швидкості газу описуються виразами:

$$U_g = \bar{U}_g + U \sin \omega t; \quad (1)$$

$$V_g = V \sin \omega t; \quad (2)$$

$$W_g = W \sin \omega t, \quad (3)$$

де  $U$ ,  $V$ ,  $W$  – повздовжня, поперечна і дотична швидкості частинки, м/с;  $\omega$  – лагранжева частота пульсації,  $s^{-1}$ .

Два останні вирази являють собою окремий випадок першого, тому що  $V = W = 0$ . Отже, достатньо розглянути рух частинки, що здійснюється під впливом швидкості руху середовища, який визначається лише першим виразом.

Розглядаючи рух окремо взятої частинки в молі газу, можна обмежитися тими ж силами, що і у в'язкому ламінарному середовищі. У цьому випадку рівняння руху частинки має вигляд:

$$dU/dt + \beta U = \beta(\bar{U}_g + U \sin \omega t), \quad (4)$$

де  $\beta = 18\mu / \rho\delta^2 = 1/\tau$  – фактор інерційності частинки, який називають “постійною часу”,  $s^{-1}$ ;  $\tau$  – час релаксації частинок, що визначається для дрібнодисперсних частинок виразом  $\rho\delta^2 / 18\mu$ , с.

Розв’язок диференційного рівняння (4) при початковій умові  $U(0) = U_0$  матиме вигляд:

$$U(t) = \frac{\beta^2 U}{\beta^2 + \omega^2} \left( \sin \omega t - \frac{\omega}{\beta} \cos \omega t \right) + \left( U_0 - \bar{U}_g + \frac{\beta U_0 \omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) e^{-\beta t} + \bar{U}_g. \quad (5)$$

Для знаходження середнього значення швидкості руху частинки усереднюємо рішення по періоду пульсацій. Перший, періодичний член в правій частині розв’язку при цьому дає нуль, а другий, неперіодичний член для дрібних частинок з  $\tau < T$  швидко прагне до нуля і як нестационарна складова швидкості має бути відкинутий. У результаті для середньої швидкості руху частинки  $U_s$  отримуємо вираз:

$$U_s = \bar{U}_g.$$

Процес руху дрібних зважених частинок під дією відцентрової сили в турбулентному потоці складається з двох процесів: а) безперервного руху частинок до стінки циклону всередині пульсаційних молей, що їх переносять; б) безладного руху в напрямку, частоті і амплітуді руху частинок разом з пульсаційними полями, що їх несуть.

На дрібнодисперсні частинки переважає дія турбулентних вихорів, які не дають можливості частинкам виділитися з потоку і разом з вихорами вони підходять до внутрішньої стінки. Основною задачею на цьому етапі є звільнення їх від впливу вихору, що можливо лише при його руйнуванні. Цього можна досягти завдяки виготовленню внутрішньої стінки (вихлопного патрубку виходу чистого повітря) не суцільною, а у вигляді жалюзійного відокремлювача різних модифікацій, що дозволить інтенсифікувати процес пилоочищення за рахунок трьох ефектів:

- руйнування крупномасштабних турбулентних вихорів при їх проходженні через жалюзі відокремлювача і зменшення енергії транспортування ними пилу;
- первинного пилоосадження на поверхні жалюзі відокремлювача;
- зменшення зворотнього дифузійного потоку від стінки циклону за рахунок різниці тисків біля стінки корпусу і жалюзійного відокремлювача.

Руйнування великомасштабних турбулентних вихорів дозволяє апроксимувати рух пилогазового потоку макрохарактеристиками. Розміри жалюзі і відстані між ними визначають лінійні масштаби та інші характеристики великовихрової турбулентності пилогазового потоку при його взаємодії з жалюзійним відокремлювачем.

Лінійні масштаби турбулентності, що характеризують переміщення поперек і вздовж потоку великих вихорів ( $L_{v0}$ ,  $L_{u0}$ ), можна отримати з формули Жуковського для аеродинамічної сили, прикладеної до вихору-циліндру одиничної довжини, і направленої по нормалі до його осі:

$$P_y = \pi r_0 P_g U^2 A_0 / \Delta c, \quad (6)$$

де  $P_y$  – поперектова сила, Н;  $r_0$  – радіус вихору, м;  $P_g$  – густина газу  $\text{кг/м}^3$ ;  $U$  – повздовжня швидкість обтікання вихору (амплітуда пульсацій), м/с,  $A_0$  – параметр завихреності;  $\Delta c$  – товщина шару зміщення, м.

Розміри жалюзі, їх форма і відстань між ними визначають лінійні масштаби та інші характеристики багатовихрової турбулентності пилогазового потоку під час його проходження через жалюзійний відокремлювач.

Відстань між жалюзі (ширина щілин відокремлювача) повинна задовольняти дві вимоги: можливості проходження необхідної кількості очищеного повітря через відокремлювач і запобіганню проходженню турбулентних вихорів, які несуть крізь них зважені частинки.

Перша вимога виконується вибором кількості жалюзі після розрахунку їх ширини, виходячи з другої вимоги. Враховуючи, що повітряний потік складається з вихорів, які обтікаються ламінарним потоком, вважаємо, що ламінарні складові частинки пилу рухаються під дією відцентрових сил від центру апарата, і в шарі повітря, який обтікає жалюзі, їх немає. А саме ця складова має проходити через жалюзійний відокремлювач, причому вихори, які несуть пилові частинки, мають відбиватися жалюзі або руйнуватися на їх поверхні. Тому друга умова буде виконана, якщо ширина щілин між жалюзі буде меншою за радіус вихорів.

Час переміщення вихору в поперечному і повздовжньому напрямках однаковий, а саме ( $\Delta t_v = \Delta t_u$ ). При цьому отримуємо рівність відношення шляхів пробігу вихору кубу відношення відповідних компонент відносної швидкості, яке можна вважати таким, що дорівнює відношенню амплітуд пульсаційної швидкості.

Підставляючи відношення компонент швидкості, дістанемо для переміщень (шляхів пробігу) вихору такі вирази:

$$\frac{L_{v0}}{\Delta c} = \frac{0,325}{A_0} \quad (7)$$

$$\frac{L_{u0}}{\Delta c} = \frac{0,625}{A_0}. \quad (8)$$

Товщина зони змішування в початковій ділянці, згідно з дослідними даними, дорівнює:

$$\Delta c = 0.27x. \quad (9)$$

Тому

$$\frac{L_{v0}}{x} = \frac{0,09}{A_0} \quad \text{і} \quad \frac{L_{u0}}{x} = \frac{0,17}{A_0}. \quad (10)$$

Знаючи розмах поперечних переміщень вихору і товщину зони змішування, можна оцінити величину радіусу вихору. Поперечний переріз потоку заповнений трьома його складовими частинами: товщиною вихору  $2r_0$ , подвійним шляхом поперечного переміщення вихору  $2L_{v0}$  і товщею потоку, що оточує вихор  $\Delta y$ . Отже:

$$\Delta c = 2r_0 + 2L_{v0} + \Delta y$$

тоді

$$r_0 = 0,17\Delta c.$$

Злиття вихорів в шарі змішування, де послідовно розташовані вихори мають одну і ту ж середню поступальну швидкість, може здійснюватися тільки за рахунок відносної швидкості  $U$ , але тоді відстань між сусідніми вихорами має становити не більше двох амплітуд повздовжніх коливань.

При постійній швидкості проходження пилоповітряного потоку в корпусі пиловловлювача зверху вниз при підході вихорів, утворених в ньому, до жалюзійного відокремлювача, вони стикаються з його жалюзі і руйнуються: частина очищеного повітря проходить крізь щілини між жалюзі, зменшуючи таким чином швидкість руху потоку вздовж жалюзійного відокремлювача і за законом Бернуллі при цьому збільшується статичний тиск навколо відокремлювача, а зменшені вже вихори відкидаються до зовнішньої стінки корпусу апарата, де знов руйнуються при стиканні з нею.

**Висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень.** Зроблено теоретичне обґрунтування процесів руйнування вихорів в пилоочисних апаратах, що дозволяє розробити цілий ряд конструкцій пиловловлювачів принципово нового типу. Завдяки основним положенням цієї теорії можливо розрахувати розміри апарата, відстань жалюзійного відокремлювача від стінки корпусу, конструкцію жалюзійного відокремлювача і основні геометричні розміри його жалюзі та отворів між ними.

Застосування наведених вище наукових основ створення відцентрово-інерційних пиловловлювачів з жалюзійним відокремлювачем дозволили спроектувати цілу серію апаратів для очищення повітря від дрібнодисперсного пилу в радіоелектронній промисловості.