

УДК 621.928.9

В.А. Батлук, д-р техн. наук, проф., **В.В. Батлук** співшукач,
Національний університет «Львівська політехніка»

О.Л. Мірус, канд. техн. наук, доц.,
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

НАУКОВІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧІВ

В статті розглядається математична модель процесу транспортування та осадження твердих частинок з пилогазового середовища пиловловлюючих апаратів. Побудована розрахункова схема пиловловлення в апаратах із жалюзійним відокремлювачем принципово нового типу.

пиловловлювач, жалюзійний відокремлювач, траєкторії руху, гідродинамічна сила, параметри пиловловлення

Постановка проблеми. Ефективність існуючих пиловловлювачів не в змозі задовольнити потреби сучасного виробництва. Необхідні конструкції апаратів для очистки повітря від пилу, які б реалізували в собі теорію руйнування турбулентних вихорів, згідно з якої тверді частинки мають можливість виділитися з пилогазового потоку і відбитися до зовнішньої стінки апарату. Основна задача на цьому етапі – звільнення частинок пилу від впливу вихорів, що можливо тільки після його руйнування при зіткненні зі стінкою апарату. Цього також можна досягти завдяки виготовленню внутрішньої стінки апарату патрубком 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 становить потік газу навколо вихрестоків зі спіральними лініями току (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, по якій 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 фі-

зико-хімічні якості з'являється можливість вибору найефективнішої конструкції пиловловлювача для конкретних умов виробництва.

Аналіз останніх досліджень показує, що різкого підвищення їх продуктивності і зменшення металоємності можна досягти використанням прямооточного руху двофазних потоків у зоні розділення, при якому не накладаються обмеження на швидкість руху потоків.

Найбільш ефективним принципом пиловиділення при прямооточному русі пилогазового потоку є її відділення у відцентровому полі, інтенсивність якого може у декілька сотень разів перевищувати інтенсивність гравітаційного та інерційного полів, що і визначає основні конструктивні варіанти відцентрово-інерційних пиловловлювачів.

Аналіз існуючих теоретичних основ розділення аерозолів в полі механічних сил довів, що в даний час не створена теорія процесу розділення гетерогенних систем, яка дала б можливість на її основі розробити принципово нові конструкції апаратів пилоочистки, що змогли б задовольнити потреби сучасного виробництва. Задача пиловловлювання полягає в виділенні аерозольних частинок з пилогазового потоку. Траєкторії руху потоку в установках пиловловлення визначаються по-перше – швидкістю його руху в них, їх конструктивними особливостями, фізико-механічними, морфометричними, дисперсними, хімічними властивостями матеріалу, а по-друге – аеродинамічними характеристиками потоку в них, які визначаються гідростатичним тиском.

Метою даної роботи є вивчення процесів, які протікають у відцентрово-інерційних апаратах, створення на їх основі математичної моделі процесу і розробка принципово нових пиловловлювачів з підвищеною ефективністю роботи і зменшеними енерго- та металоємностями.

Виклад основного матеріалу. Пилоповітряна суміш рухається в трубопроводі у вигляді циліндра (пробки), в пристінній ділянці якої існує перехідна зона, де створюються напруження зсуву і чиниться опір руху матеріалу. Інший характер опору створюють елементи конструкції пиловловлювача (жалюзі, діаметр, висота, розміри вхідного патрубку, тощо).

Втрати тиску на ділянці трубопроводу довжиною l (рис. 1) визначаються із умови сталості різниці сил, що діють на торці виділеної циліндричної ділянки суміші, силам внутрішнього тертя в перехідній зоні, тобто:

$$\pi r^2 (P_2 - P_1) = 2\pi r l \cdot \tau, \quad (1)$$

де r – радіус циліндра (пробки), що рухається, м;
 P_1, P_2 – тиск на торцях циліндра, Па;
 τ – напруження зсуву в перехідній зоні, Па;
 l – довжина циліндра (пробки), м.

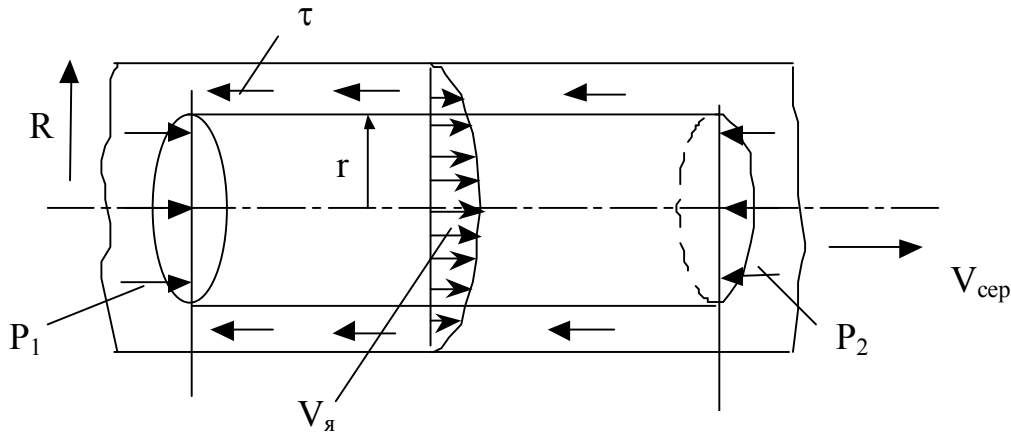


Рисунок 1 - Схема розрахунку опору руху пилоповітряної суміші в трубопроводі

Напруження зсуву є характеристикою реологічних властивостей матеріалу, що транспортується, і залежить від напружено-деформованого стану в середині циліндра (пробки) та режимів руху. Для вивчення реологічних властивостей матеріалів, що підлягають вловленню, необхідні дослідження за спеціальною методикою, яка враховує особливості сумішей. Як показують дослідження, в деяких випадках їх можна представляти пластичною моделлю зі зміцненням.

Математична задача пилотловлення зводиться до описання траєкторій руху пилогазового потоку в апараті з оцінкою на певних ділянках умови випадання твердих аерозольних частинок з них. Це задача про рух пластичного середовища в умовах плоскої (чи об'ємної) деформації. Такі задачі розглянуті в ряді робіт, стосовно напруженого стану в газах, сипучих середовищах, пластичних тілах.

В теорії струй (Абрамович Г.Н. та ін.) розглядаються закономірності руху частинок пилу (чи взагалі повітря) в вільному (відкритому) потоці. При цьому розглядається рух окремих частинок в повітряному потоці і характер їх взаємодії з повітрям внаслідок зміни траєкторій, швидкості руху, тощо.

Якщо мова йде про рух запиленого повітря в апаратах, на наш погляд, доцільно відокремитись від особливостей руху в середині потоку (тобто процесу), а необхідно розглядати взаємодію повітряного потоку зі стінками апаратів. Тут ми повинні розглядати цю систему в

координатах напруження (σ) і швидкості (V).

При розгляданні плоскої задачі в кожній точці середовища маємо п'ять невідомих функцій:

$$\sigma_x = \sigma_x(x, y, t); \quad \sigma_y = \sigma_y(x, y, t); \quad \tau_{xy} = \tau_{xy}(x, y, t); \quad (2)$$

$$V_x = V_x(x, y, t); \quad V_y = V_y(x, y, t). \quad (3)$$

де три - компоненти напружень (дві нормальних і одна дотична) і дві – проекції вектора швидкості на осі x і y .

Рівняння стану складаємо в змінних Ейлера і отримаємо рівняння руху (рівняння динамічної рівноваги) пилоповітряної суміші в трубопроводі. На рис. 2 показаний елемент середовища з розмірами $dy \cdot dx$.

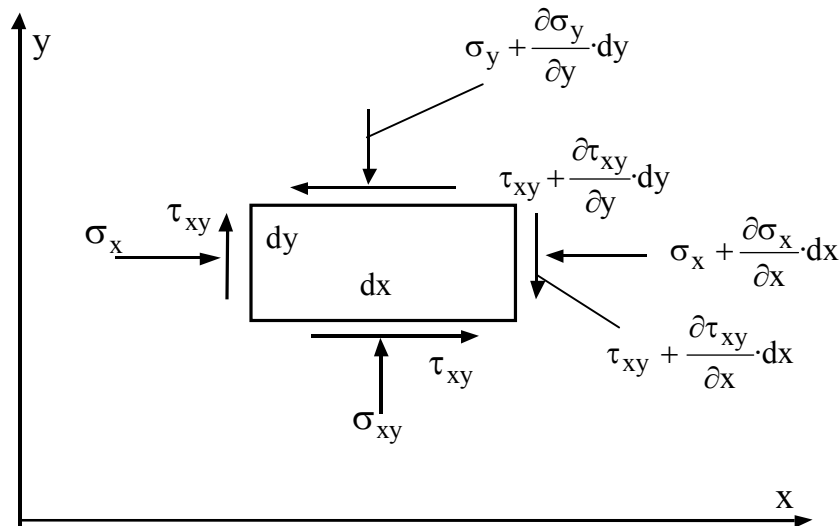


Рисунок 2 - Схема дії сил при плоскому напруженому стані

За додатній напрямком напружень приймаємо напрямок, що показаний на рис. 2. Враховуючи, що проекції на осі x і y головного вектора всіх сил, що діють на елемент, дорівнює нулю, отримаємо:

$$\sum P_{nx} - m \frac{d^2x}{dt^2} = 0; \quad \sum P_{ny} - m \frac{d^2y}{dt^2} = 0; \quad (4)$$

де

$$m = \rho \cdot dx \cdot dy,$$

$$\sum P_{nx} = \rho X dy \cdot dx - \frac{\sigma_x}{\partial x} \cdot dy dx - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \cdot dy \cdot dx; \quad (5)$$

$$\sum P_{ny} = \rho Y dx \cdot dy - \frac{\sigma_y}{\partial y} \cdot dy dx - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \cdot dy \cdot dx,$$

де X , Y – відповідні проекції масових сил, додатній напрямок яких збігається з додатнім напрямком осей координат.

Для частинного випадку вагатомого середовища зі щільністю ρ , коли $X = 0$; $Y = g\rho$, отримаємо вираз:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y}; \quad (6)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y}.$$

Остаточний вигляд рівнянь руху пилоповітряної суміші в трубопроводі:

$$X - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) = \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y}; \quad (7)$$

$$Y - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y}.$$

Для визначення третього рівняння, що визначає невідгідне поєднання (сполучення) нормального і дотичного напруження (так звана умова міцності, за термінологією опору матеріалу), тобто умови руйнування структури матеріалу необхідно провести експериментальні дослідження напружено-деформованого стану. Для деяких матеріалів встановлено, що ця залежність в координатах $\sigma - \tau$ – має нелінійний характер, як огиначаюча кругів Мора.

Вивчення і аналіз цієї залежності показали, що вона являє собою відому умову граничної рівноваги, яка полягає в тому що влюбій точці середовища в області граничної рівноваги максимальна різниця дотичного напруження і відповідного нормального напруження, помноженого на тангенс кута внутрішнього тертя, дорівнює граничному напруженню зчеплення K_0 .

Ця умова виражається рівнянням

$$|\tau_n| - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi = K_0, \quad (8)$$

або

$$(\sigma_x + \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \sin^2 \varphi (\sigma_x + \sigma_y + 2K_0 \operatorname{ctg} \varphi)^2,$$

де τ_n – дотичне напруження в точці на площадці з нормаллю \bar{n} ;
 σ_n – відповідне нормальне напруження.

Даний вираз – умова руйнування структури матеріалу. Для аналізу цієї залежності перетворимо її до зручного вигляду. Виразимо нормальну σ_n і дотичну τ_n компоненти вектора напружень, що діють на якій-небудь площадці, через головні нормальні напруження σ_1 і σ_2 за формулами перетворення:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\gamma, \quad (9)$$

$$|\tau_n| = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\gamma,$$

де γ – абсолютна величина кута між нормаллю до площадки – віссю n і головною віссю I .

З наведених рівнянь отримаємо вираз:

$$\begin{aligned} |\tau_n| - (\sigma_n - K_0 \operatorname{ctg} \varphi) \cdot \operatorname{tg} \varphi = \\ = \frac{1}{2} \cos \varphi [(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \sin(2\gamma - \sin \varphi (\sigma_1 + \sigma_2 + 2K_0 \operatorname{ctg} \varphi))] \end{aligned} \quad (10)$$

з якого видно, що руйнування структури матеріалу досягає мінімуму, при куті $2\gamma = \pi - 2\lambda$, причому, $2\lambda = \pi/2 - \varphi$ визначає положення площадок ковзання (рис. 3). Таких площадок дві. Вони направлені до головної осі I під кутами $\pm \gamma$ і утворюють між собою кут λ (рис. 4).

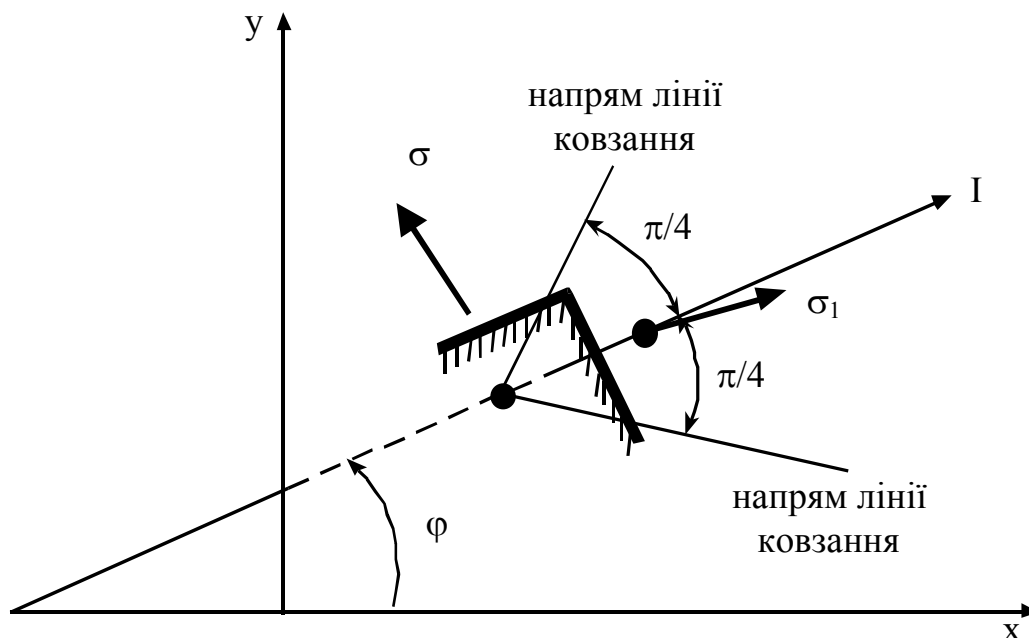


Рисунок 3 - Умова граничної рівноваги

Два сімейства ліній, що збігаються в кожній точці з напрямками цих площадок, називають першим і другим сімействами ліній ковзання.

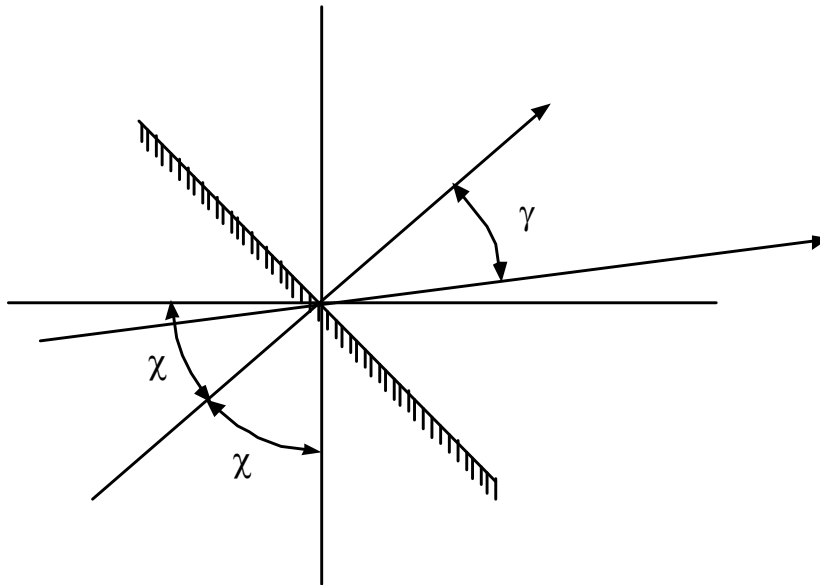


Рисунок 4 - Умови руйнування структури матеріалу

Можна також замість третього рівняння скористатись рівнянням стану середовища, провівши відповідні випробування або прийнявши певну модель суміші, що транспортується (пластичний газ зі зміцненням) (рис. 5).

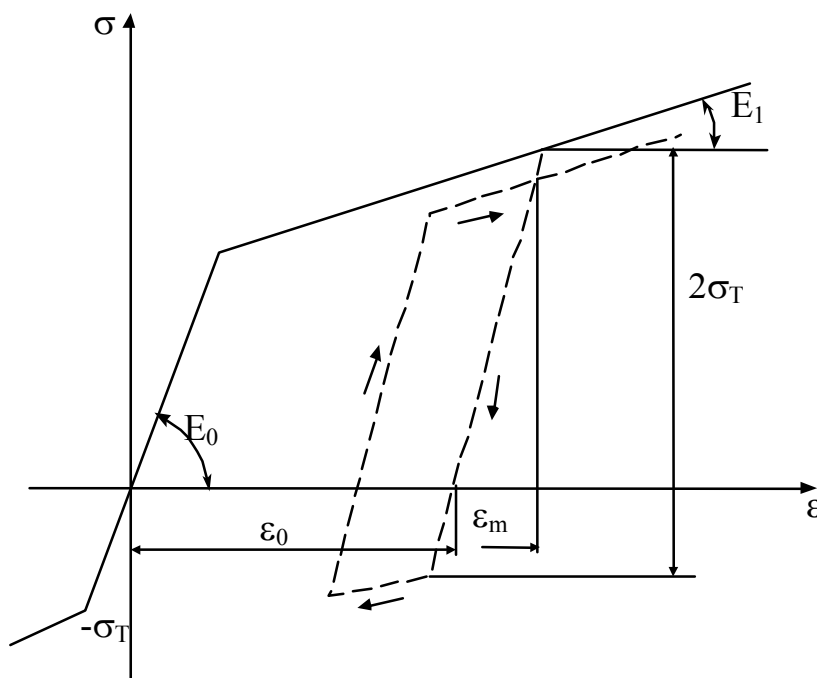


Рисунок 5 - Навантаження, розвантаження, повторне навантаження ідеалізованого пластичного середовища зі зміцненням

Ці залежності мають вигляд:

$$\sigma_x = F_1(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy});$$

$$\sigma_y = F_2(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy});$$

$$\tau_{xy} = F_3(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})$$

і характеризують реакцію фізичної системи на завантаження і являють собою математичну ідеалізацію механізму поведінки матеріалу.

Щоб дослідити природу цих функцій, розглянемо деформацію зразків ідеалізованого середовища під навантаженням (рис. 5). Випробування на розтягування і стиснення показують, що при малих деформаціях графічні залежності між напруженнями і деформаціями являють собою майже прямі лінії. Це означає, що, якщо б ми розклали рівняння $\sigma_x = f_1(\varepsilon)$, $\sigma_y = f_2(\varepsilon)$, $\tau_{xy} = f_3(\varepsilon)$ в ряд Маклорена, тоді суттєвими були б тільки члени першого порядку. Для кожного з цих рівнянь отримали б вирази:

$$\sigma_x = (F_1)_0 + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \varepsilon_x}\right)_0 \varepsilon_x + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \varepsilon_y}\right)_0 \varepsilon_y + \left(\frac{\partial F_1}{\partial \gamma_{xy}}\right)_0 \gamma_{xy}, \quad (11)$$

де $(F_1)_0$ - нуль в індексі – величина функції F_1 , тобто функції визначеної з рівняння стану газової суміші і її похідних при $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \gamma_{xy}$. Коефіцієнти в цих виразах постійні. Оскільки деформації неможливі без напружень, отримаємо рівняння:

$$\sigma_x = k_{11}\varepsilon_x + k_{12}\varepsilon_y + k_{13}\gamma_{xy};$$

$$\sigma_y = k_{21}\varepsilon_x + k_{22}\varepsilon_y + k_{23}\gamma_{xy}; \quad (12)$$

$$\tau_{xy} = k_{31}\varepsilon_x + k_{32}\varepsilon_y + k_{33}\gamma_{xy};$$

Більш зручно записати ці залежності у вигляді (c_{ij} – постійні):

$$\varepsilon_x = c_{11}\sigma_x + c_{12}\sigma_y + c_{13}\tau_{xy};$$

$$\varepsilon_y = c_{21}\sigma_x + c_{22}\sigma_y + c_{23}\tau_{xy}; \quad (13)$$

$$\gamma_{xy} = c_{31}\sigma_x + c_{32}\sigma_y + c_{33}\tau_{xy}.$$

Для середовища ізотропного і однофазового:

$$\varepsilon_x = c_{11}\sigma_x + c_{12}\sigma_y;$$

$$\varepsilon_y = c_{11}\sigma_x + c_{12}\sigma_y; \quad (14)$$

$$\gamma_{xy} = 2(c_{11} - c_{22})\tau_{xy}.$$

Для пружного середовища:

$$c_{11} = \frac{1}{E_0}; \quad c_{11} = -\frac{\mu}{E}, \quad (15)$$

де E_0 – модуль пружності;
 μ – коефіцієнт Пуансона.

Четвертим рівнянням, що зв'язує пошукові функції, слід прийняти рівняння суцільного середовища (середовища, що стискається):

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + V_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + V_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \quad (16)$$

П'яте рівняння, що замикає систему, отримаємо із умови збігання максимальних швидкостей деформацій зсуву з напрямком ліній ковзання.

В основу побудови рішення задачі про опір пиловловлювачів нами покладено припущення про те, що опір P в елементах конструкції пиловловлювачів (рис. 6) (пряма ділянка, поворот, жалюзі і т. ін.) є функцією напруженого стану на цій ділянці.

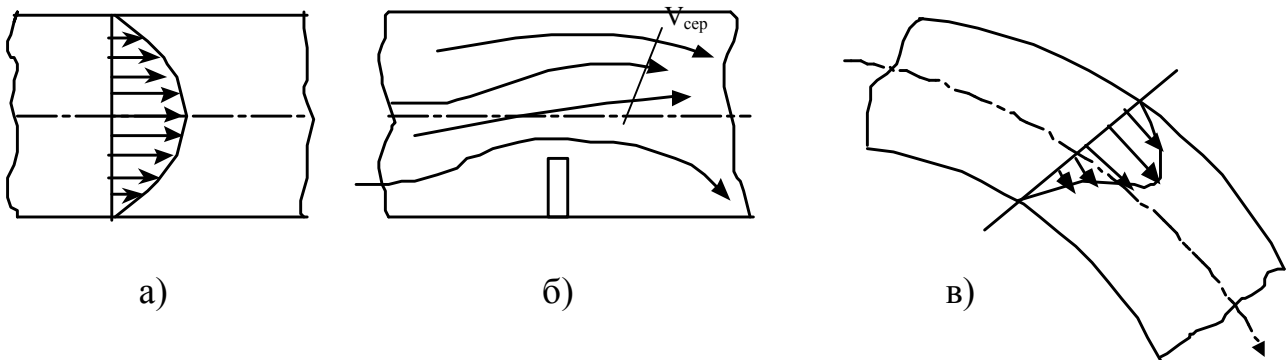


Рисунок 6 - Фізична суть граничних умов в визначенні опору:
 а) в прямолінійній ділянці; б) в жалюзях; в) в криволінійній ділянці

З фізичної точки зору при виконанні умови граничної рівноваги напружений стан в кожній точці повністю визначається функцією ρ , тобто:

$$P = P(\sigma), \quad (17)$$

і визначається на основі експериментальних даних. Вигляд її залежить не тільки від реологічних властивостей середовища, але і особливостей конструкції апарату, тобто:

$$\frac{\partial P}{\partial \psi} = \frac{\partial P}{\partial \sigma} = \frac{\partial \sigma}{\partial \psi} = P'_\sigma \frac{\partial \sigma}{\partial \psi}, \quad (18)$$

де ψ – деяка незалежна змінна.

Підставляючи це в рівняння суцільності отримаємо кінцевий вид рівняння:

$$\frac{\rho_\sigma}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} + V_x \frac{\partial \sigma}{\partial x} + V_y \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right) + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0. \quad (19)$$

Дана умова широко застосовується при рішенні різних задач механіки суцільних середовищ:

$$\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \pm \frac{\partial V_x}{\partial x} \operatorname{tg} \varphi}{\frac{\partial V_x}{\partial x} \pm \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \operatorname{tg} \varphi}. \quad (20)$$

Вибір певного знаку визначається тим, яке з сімейств ліній ковзання (перше чи друге) активне.

Таким чином, система рівнянь стану руху газоповітряної суміші в пиловловлювачах запишеться:

$$x - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) = \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y}; \quad (21)$$

$$y - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) = \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y};$$

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = \sin^2 \varphi (\sigma_x + \sigma_y + 2kctg\varphi)^2;$$

$$\frac{\rho'_\sigma}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} + V_x \frac{\partial \sigma}{\partial x} + V_y \frac{\partial \sigma}{\partial y} \right) + \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0; \quad (22)$$

$$\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \pm \frac{\partial V_x}{\partial x} \operatorname{tg} \varphi}{\frac{\partial V_x}{\partial x} \pm \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \operatorname{tg} \varphi}.$$

Висновки. Дослідження процесів, які протікають у відцентрово-інерційних пиловловлювачах дозволили створити їх математичну модель, яка лягла в основу конструювання апаратів принципово нового типу, з підвищеною ефективністю роботи та зменшеними енерго і металоемкостями.

Все це дає можливість довести концентрацію пилу при проведенні цілого ряду технологічних процесів до гранично-допустимих норм, зменшивши тим самим його пожежо-вибухонебезпечні якості.

В даний час проводиться впровадження запропонованої конструкції пиловловлювача у металообробній промисловості.

Список літератури

1. Батлук В.А. Математичне моделювання процесу очищення повітря від пилу у відцентрово-інерційних пиловловлювачах / В.А.Батлук, Р.М.Василів, Р.Ю.Сукач // Екологічна безпека. – 2008 - Вип. 2 – 4. - С. 17-20.
2. Batluk V. V., Makarchuk V.G. The Problem of Highly Effective Cleaning of air from dust/ Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power in Agriculture 11/ 2009, Lublin, pag. 26 – 31.
3. Батлук В.В. Один из путей решения проблем устранения промышленной опасности, создаваемой мелкодисперсной пылью / В.В.Батлук, О.В.Мельников // Юбилейные научные чтения «Белые ночи-2008» ; Материалы Международных научных чтений Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. – С-Пб.:Изд-во МАНЭБ, 2008 – Ч. 2. - 491с.
4. Проскуріна І.В. Математична модель процесу очищення запиленого потоку в технологіях машинобудування / І.В.Проскуріна, В.В.Батлук // Вісник нац.тех.університету України «Київський політехнічний інститут».Серія: Машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ». - № 58. – 2010. - С.87-94.
5. Batluk V. V., Makarchuk V.G. A matemtical model of vacuum cleaners, taiking into account the motion of particles near the wall part of the lust cjllektor/ Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power inlustry in Agriculture 12/ 2010, Lublin,pag. 97 – 105/.
6. Батлук В.В. Пиловловлювач / В.В. Батлук, М.В. Басов // Вісник нац.тех.університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ». - № 58. – 2010. - С.87-94.

В.А. Батлук, В.В. Батлук, О.Л. Мирус. Научные основы создания пылеуловителей. В статье рассматривается математическая модель процесса транспортирования и осаждения твердых частиц из пылегазовой струи пылеулавливающих аппаратов. Построена расчетная схема пылеулавливания в аппаратах с жалюзийным отделителем принципиально нового типа.

пылеулавливающий аппарат, жалюзийный отделитель, траектории движения, гидродинамическая сила, параметры пылеулавливания

V.A.Batluk, V.V.Batluk, O.L.Mirus. Scientific Basis for Creating Dust Collectors. A mathematical model of the process of transporting and deposition of solid particles from the dust stream of dust collectors is provided. A loading diagram of dust collecting in devices with a louvre separator of a new type is developed.

dust collector, louvre separator, motion path, hydrodynamic force, dust collection parameters

Стаття надійшла до редколегії 24.10.2010

Рецензент : д-р техн. наук, проф. каф. охорони праці

НУ «Львівська політехніка»

Г.Г. Гогіашвілі

© Батлук В.А., Батлук В.В., Мирус О.Л., 2010