

В.А.Батлук¹ д-р техн.наук, проф., Е.В. Романцов², Н.М. Параняк¹
1 - Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, Україна,
2 - Державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

МОДЕЛЬ ВПЛИВУ ІНЕРЦІЙНИХ СИЛ І СИЛ ОПОРУ НА РУХ ЧАСТИНКИ У ВІДЦЕНТРОВО – ІНЕРЦІЙНИХ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧАХ

В статье приводится физическая сущность явлений, которые протекают в центробежно-инерционных пылеуловителях, определен характер распределения давлений и скоростей в них, проанализированы силы, которые действуют на частицы аэрозоля, что позволяет раскрыть физическую сущность процесса движения воздушного потока в проектируемом аппарате, определить влияние, действующих на частицы аэрозоля в радиальном направлении сил на характер их движения, значительно снизить количество экспериментальных исследований по изучению влияния параметров аппарата на эффективность его работы.

In clause to be resulted the physical essence of the phenomena which proceed in vortical dedusters, character distribution of pressure and speeds in them is certain, forces which act частички an aerosol that allows to open physical essence of process of movement of an air stream in the projected device are analysed, to define the influence, acting частички an aerosol in a radial direction of forces on character of their movement, considerably to lower quantity of experimental researches on studying influence of parameters of the device on efficiency of its work.

Постановка проблеми. Екологічна обстановка в Україні постійно погіршується. Одна з основних причин: наближується до катастрофічного стану більша частина основних виробничих фондів країни, безнадійно зношених і не маючих нормального технічного обслуговування. Впливає також і те, що потенційно небезпечні народногосподарські об'єкти металообробного, атомного, енергетичного, хімічного, транспортного, металургійного, машинобудівного, оборонного і будівельного комплексів створювалися та експлуатувалися без належного врахування всіх складових екологічної та технологічної безпеки, умов і можливостей захисту людини, населення, об'єктів, території і середовища існування від техногенних і природних аварій і катастроф. У широких масштабах використовувалися екологічно недосконалі технології в промисловості, сільському господарстві, енергетиці, на транспорті.

Необхідно визначити кореляцію між забрудненням атмосферного повітря у регіонах України і зростанням захворювань у населення, а також провести аналіз існуючих пилоочисних апаратів та запропонувати високоефективні пилоловлювачі для очистки повітря від пилу.

Для оточуючого середовища та здоров'я людини значну небезпеку становлять викиди пилових речовин які значно погіршують екологічний стан довкілля, викликають передчасне зношення промислового обладнання та об'єктів житлово-комунального господарства, наносять шкоду здоров'ю людей. Потужний розвиток промислового виробництва супроводжується використанням широкого асортименту речовин природного і штучного походження, що призводить до зміни якісного і кількісного складу викидів в атмосферу.

Загалом спостерігається тенденція до зростання екологічного ризику внаслідок збільшення у виробничих процесах частки застарілих технологій та обладнання, зниження темпів відновлення та модернізації виробництва. У середньому зношення основних виробничих фондів усіх галузей господарства України становить близько 50 %, причому темпи оновлення фондів не відповідають темпам їхнього спрацювання. Все це збільшує рівень забрудненості повітря і техногенного навантаження на інші компоненти довкілля.

Спостерігається зростання випадків захворювань, спричинених вживанням неякісної питної води та продуктів харчування, забрудненим повітрям (гепатит, легеневі, онкологічні хвороби, гіпертонічна хвороба, алергічний дерматит, гострі респіраторні захворювання з астматичним компонентом). Стан здоров'я населення є одним з основних критеріїв якості навколишнього середовища. У структурі загальної захворюваності населення все більшої питомої ваги набувають хвороби, які є наслідком техногенного забруднення довкілля, зокрема атмосферного повітря. Об'єктивні медичні дані свідчать про все зростаючий вплив екологічних чинників на фізичний потенціал нашого суспільства.

Аналіз останніх досліджень. Темпи зростання ефективності роботи комплектуючих апаратів схем пилоочищення помітно відстають від вимог до них ще і з точки зору енерго- і металомісткості.

Аналіз відомих методів сухого пилоочищення показує, що незважаючи на високоефективне вловлення великодисперсного пилу, вони не можуть забезпечити очищення дрібнодисперсної фракції вище за 85%, а ряд конструктивних удосконалень веде до значного ускладнення схем пилоочищення.

Найбільші досягнення у відцентровому вловленні твердих частинок з газового потоку відмічені в частині апаратурного оформлення (конструювання), а не наукових розробок, що пояснюється, з одного боку, накопиченням багаторічного досвіду експлуатації промислових апаратів, а з іншого – надзвичайною складністю опису окремих явищ і характеристик гетерогенних систем: тверде тіло – газ у відцентровому полі.

Метою роботи є використання нових принципів конструювання апаратів пилоочищення, що поєднують в одному корпусі декілька ступенів очищення, заснованих на використанні відцентрових, інерційних і сил тяжіння або зміні фізичних параметрів пилу.

Рішення актуальної наукової проблеми: забезпечення високоєфективного вловлювання полідисперсного пилу шляхом створення принципово нових конструкцій апаратів для очищення повітря від пилу, з метою зменшення шкідливих викидів і негативного впливу на здоров'я людини, і наступним використанням пилоподібних частинок у різних галузях промисловості, у тому числі для виробництва будівельних матеріалів і виробів представляють сьогодні першочергове завдання.

Разом з тим багато важливих аспектів проблеми вивчені недостатньо, у ряді випадків експериментальні дані часткові й суперечливі, а фізичні подання й моделі незадовільні. Так, наприклад, донедавна струменеві двофазні потоки розраховувалися переважно на основі різних модифікацій теорії змішання потоків Прандтля, тобто з використанням моделей «нульового порядку». Однак дослідження пилогозового потоку в очисних апаратах висувають завдання більше детального опису явищ турбулентного переносу у двофазному середовищі, що вимагає вивчення не тільки усереднених, але й пульсаційних характеристик потоку.

Рух зважених частинок у турбулентному потоці газу відрізняється набагато більше, ніж у ламінарному потоці, складністю й інтенсивністю в поздовжньому й всіх інших напрямках. Це обумовлено тим, що часинки, якщо вони не занадто великі, реагують на хаотичні турбулентні пульсації середовища й разом з поступальним рухом потоку під їх впливом отримують пульсаційний (коливальний) рух відносно несучих їхніх молів газу й безладне переміщення разом з молями газу, іменоване турбулентною дифузійною частиною.

Як і рух молів газу, пульсаційний та дифузійний рух частинок мають стохастичний (випадковий) характер і тому описуються статистично. Такий же характер носить і рух частинок під дією відцентрових сил і сил тяжіння в пилоочисних апаратах, роблячи разом з несучими їх пульсаційними молями хаотичні спуски й підйоми.

Фізична картина розвиненого турбулентного потоку схематично виглядає як ієрархія вихрів (збурень) різного масштабу, у якій вихри даного масштабу виникають за рахунок втрати стійкості й розпаду більших вихрів, що передають їм свою енергію при цьому енергія усередненого руху середовища послідовно передається збуренням все меншого масштабу, що приводить, в остаточному підсумку, до утворення найбільш дрібних вихрів, кінетична енергія яких за рахунок дії сил в'язкості трансформується в теплоту (так звана каскадна схема Річардсона).

Виклад основного матеріалу. Нами поставлена задача описати рух двофазного потоку в пиловловлювачі нової конструкції і здійснити її числову реалізацію. Числовий аналіз процесів динаміки можна здійснювати у тому випадку, коли закони, які описують процеси руху виражені у математичній формі, як правило у вигляді диференціальних рівнянь. Кожне з таких рівнянь описує певний закон збереження в якому змінною є деяка фізична величина і відображається баланс між різноманітними факторами, які мають вплив на цю змінну. Зазвичай залежними змінними в таких диференціальних рівняннях є питомі властивості, тобто властивості, які відносяться до одиниці маси. Члени диференціального рівняння такого типу виражають дію на одиницю об'єму.

Постановка задачі про рух повітряного потоку в апараті включає наступні основні кроки:

- опис загальних припущень, граничних та початкових умов;
- математична модель руху повітряних потоків в апараті з врахуванням моделі турбуленції;
- математична модель руху твердої фази (частинок пилу) у апараті;
- вибір методу розв'язування та його реалізація
- метод визначення ефективності процесу очищення потоку від частинок пилу.

Для коректного опису процесу сепарації частинок пилу у пиловловлювачі запропонованої конструкції були прийняті певні допущення, які, з одного боку будуть наближати математичну модель до конкретних умов функціонування апарата, а з іншого – запобігати надмірному ускладненню моделі.

При дослідженні двофазного потоку в розробленій конструкції пиловловлювача для розрахунку були прийняті наступні допущення.

- частинки пилу є твердими і не взаємодіють між собою;
- на вході в апарат потік має рівномірне поле швидкості;
- опір рухові частинок в газовому середовищі описується законом Стокса;
- тангенціальна і осьова складові швидкості частинки співпадає з тангенціальною і осьовою складовими швидкості обертання газового потоку, відповідно, радіальні швидкості внаслідок дії сил інерції є різними.

Для того, щоб розв'язок задачі про рух повітряних потоків був єдиним потрібно задати початкові і граничні умови, які, в свою чергу, визначаються формою і конструктивними особливостями пиловловлювача та умовами його роботи, тобто для кожного типу циклона існує свій набір початкових і граничних умов.

Початковими умовами для даного апарату є характеристики повітряного середовища і характеристики пилу:

- атмосферний тиск за нормальних умов $p_0 = 101325$ Па;
- температура повітря за нормальних умов $m_0 = 293$ К;
- густина повітря $\rho_g = 1,293$ кг/м³;
- середній (медіанний) діаметр частинок пилу $d_{50} = (5-30) \cdot 10^{-6}$ м;
- максимальний діаметр частинок пилу $d_{max} = 50 \cdot 10^{-6}$ м;
- мінімальний діаметр частинок пилу $d_{min} = 10^{-5}$ м;
- густина частинок пилу $\rho_s = 2000-4000$ кг/м³;

Граничні умови накладаються на розв'язок задачі про рух потоку і повинні виконуватися в кожен момент часу цього руху. Крім того граничні умови визначаються характером руху повітря на граничній поверхні. Граничні умови задати важче, оскільки вони залежать як від форми пиловловлювача, так і від особливостей його функціонування. Граничні умови залежать і від густини газу. Газ великої густини „прилипає” до стінок пиловловлювача в той час, як розріджений газ ковзає по граничних поверхнях. Проте незважаючи на особливості є певні закономірності при

заданні граничних умов при русі запиленого повітря в пилоочишувачі, які ми і задаємо, а саме: 1) рівність нулю швидкості на нерухомій твердій границі; 2) швидкість пилоповітряного потоку на вході в пиловловлювач стабільна і дорівнює 18 м/с.

На частинки пилу при русі їх в закрученому потоці, з урахуванням раніше зроблених допущень, впливають наступні сили:

Сила тяжіння:

$$F_T = m_q \cdot g = \frac{\pi d_q^3}{6} \cdot (\rho_q - \rho_g) \cdot g \quad (1)$$

де m_q – маса частинки, кг; g – прискорення сили тяжіння, м/с²; d_q – діаметр частинки, м; ρ_q – густина частинок пилу, кг/м³; ρ_g – густина повітря, кг/м³.

Відцентрова сила:

$$F_y = m_q \cdot \frac{W_{zT}^2}{R} = \frac{\pi d_q^3}{6} \cdot (\rho_q - \rho_g) \cdot \frac{W_{zT}^2}{R}, \text{ Н} \quad (2)$$

де W_{zT} – тангенціальна складова швидкості обертання потоку повітря, м/с; R – радіус обертання потоку, м.

Як видно з наведених рівнянь (1 і 2), різницею густин ($\rho_q - \rho_g$) враховується і сила витіснення середовища (сила Архімеда).

На рухомих в потоці газу частинку діє сила опору середовища (сила Стокса) [1]:

$$F_c = 3\pi\mu_z d_q W_q \chi, \quad (3)$$

де μ_z – динамічна в'язкість, Па·с; V_q – швидкість осадження частинки щодо газового середовища, м/с; $\chi=2,9$ – динамічний коефіцієнт форми частинки пилу для змішаних тіл.

Якщо врахувати, що для зваженої частинки, рухомої в потоці газу сила Стокса F_c дорівнює сумі зовнішніх сил і направлена у зворотному напрямі, то:

$$\overline{F_c} = \overline{F_T} + \overline{F_y} \quad (4)$$

Розкладемо сили (4) по осях y і z :

$$\begin{aligned} F_{cy} &= F_{yy}; \\ F_{cz} &= F_{yz}, \end{aligned} \quad (5)$$

Використовуючи рівняння (1, 3, 4 і 5), виразимо V_{yy} і V_{yz} – проєкції швидкості осадження частинки щодо газового середовища на осі координат y і z :

$$W_{yy} = \frac{d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_g) \cdot \left(\frac{W_T^2}{R} \cdot \cos(\alpha) \right)}{18\mu_z \chi}; \quad (6)$$

і

$$W_{yz} = \frac{d_q^2 \cdot (\rho_q - \rho_g) \cdot \frac{W_T^2}{R} \cdot \sin(\alpha)}{18\mu_z \chi}, \quad (7)$$

де:

$$\sin(\alpha) = \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \cos(\alpha) = \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; R = \sqrt{y^2 + z^2}; \quad (8)$$

α – кут між віссю y і радіусом вектором точки, в якій знаходиться частинка;
 y, z – координати точки в якій знаходиться частинка.

З моделі турбулентного масопереносу одержуємо компоненти миттєвої швидкості потоку по осях координат V_x, V_y і V_z . Перетворимо їх в осьову, тангенціальну і радіальну складові швидкості для закрученого потоку повітря.

Осьова швидкість потоку в нашому випадку співпадатиме з віссю X :

$$W_{oc} = W_x. \quad (9)$$

Тангенціальна і радіальна швидкості потоку визначатимуться таким чином:

$$W_T = W_{zy} \cdot \cos(\alpha + \beta) = W_{zy} \cdot (\cos(\alpha)\cos(\beta) - \sin(\alpha)\sin(\beta)) \quad (10)$$

і

$$W_p = W_{zy} \cdot \sin(\alpha + \beta) = W_{zy} \cdot (\sin(\alpha)\cos(\beta) + \cos(\alpha)\sin(\beta)), \quad (11)$$

де:

$$\begin{aligned} W_{zy} &= \sqrt{W_y^2 + W_z^2}; \\ \sin(\alpha) &= \frac{z}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \\ \cos(\alpha) &= \frac{y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \\ \sin(\beta) &= \frac{W_y}{\sqrt{W_y^2 + W_z^2}}; \\ \cos(\beta) &= \frac{W_z}{\sqrt{W_y^2 + W_z^2}}; \end{aligned} \quad (12)$$

α - кут між віссю Y і радіус вектором точки, в якій знаходиться частинка;

β - кут між віссю Z і вектором швидкості в даній точці;

Звідси одержуємо остаточні залежності для W_T і W_p :

$$W_T = \frac{y \cdot W_z - z \cdot W_y}{\sqrt{y^2 + z^2}}; \quad (13)$$

$$W_p = \frac{z \cdot W_z + y \cdot W_y}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (14)$$

Підставивши (10) в (2) і (3), одержуємо залежність для V_{cy} і V_{cz} у кожній точці потоку:

$$W_{cy} = \frac{d_u^2 \cdot (\rho_u - \rho_\sigma) \cdot \left(\frac{y \cdot (y \cdot W_z - z \cdot W_y)^2}{(y^2 + z^2)^2} - \bar{g} \right)}{18\mu_z \chi}; \quad (15)$$

$$W_{cz} = \frac{d_u^2 \cdot (\rho_u - \rho_\sigma) \cdot \frac{z \cdot (y \cdot W_z - z \cdot W_y)^2}{(y^2 + z^2)^2}}{18\mu_z \chi}; \quad (16)$$

Відповідно до прийнятих припущень з врахуванням рівняння (5):

$$W_{cx} = W_{oc} = W_x. \quad (17)$$

Одержавши компоненти W_{cx} , W_{cy} і W_{cz} , ми можемо визначити в кожній точці потоку миттєву швидкість частинки відносно нерухомої декартової системи:

$$\bar{W}_c = W_{cx} \bar{i} + W_{cy} \bar{j} + W_{cz} \bar{k}, \quad (18)$$

де \bar{i} , \bar{j} і \bar{k} – одиничні вектори позитивних напрямів осей.

Для модуля вектора швидкості \overline{W}_q маємо:

$$W = \sqrt{W_{qx}^2 + W_{qy}^2 + W_{qz}^2}. \quad (19)$$

Одержимо швидкості частинки щодо прийнятої декартової системи координат:

$$\begin{aligned} \overline{W}_{qx0} &= \overline{W}_x; \\ \overline{W}_{qy0} &= \overline{W}_{qy} + \overline{W}_y; \\ \overline{W}_{qz0} &= \overline{W}_{qz} + \overline{W}_z; \end{aligned} \quad (20)$$

Якщо розглядати швидкості в циліндровій системі координат, то:

$$\begin{aligned} \overline{W}_{qoc} &= \overline{W}_x; \\ \overline{W}_{qr0} &= \overline{W}_T; \\ \overline{W}_{qp0} &= \overline{W}_{qp} + \overline{W}_p, \end{aligned} \quad (21)$$

де V_{qp} одержуємо аналогічно перетворенням (6-11):

$$W_{qp} = \frac{z \cdot W_{qz} + y \cdot W_{qy}}{\sqrt{y^2 + z^2}}. \quad (22)$$

Одержана в (22) швидкість – це параметр, який характеризуватиме значення швидкості частинки пилу і напрям її руху, поміщену в ту або іншу точку простору пиловловлювача. Дані значення дозволять нам оцінити ефективність апарату за різних граничних умов, при різній геометрії циклону і при різних розмірах і масі частинок пилу.

Для вивчення аеродинамічних процесів, що відбуваються у пиловловлювачі з жалюзі складної конструкції та трубою Вентурі, подальші дослідження проводилися у двох напрямках: перший полягав у дослідженні аеродинаміки створеного апарату за допомогою комп'ютерного моделювання, другий – у вивченні характеристик пиловловлювача на експериментальному стенді Національного університету «Львівська політехніка». При виготовленні моделі пиловловлювача для проведення досліджень були взяті конструкції, розроблені авторами і захищені патентами на винахід.

В процесі дослідження моделювалася робота пиловловлювачів при різноманітних швидкостях потоку повітря у вхідному патрубку, жалюзі різної конструкції. Моделювання мало на меті дослідити розподіли статичного тиску та складових швидкості потоку повітря в пиловловлювачі, гідравлічного опору апарату та його ефективності.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Експериментальні дослідження запропонованих апаратів у порівнянні з найкращим із існуючих апаратів циклоном ЦН-11 дозволяють говорити про значне (до 4-7%) підвищення ефективності вловлення дрібнодисперсного пилу у запропонованій системі пилоочистки, а це відкриває широкі перспективи для впровадження запропонованої конструкції і дозволяє знизити промисловий негативний вплив на атмосферу і зменшити загрозу глобальних наслідків для майбутніх поколінь, шляхом проведених серйозних інженерних рішень по попередженню викидів дрібнодисперсних аерозолів.

Переваги запропонованої конструкції очевидні. Збільшення ефективності пиловловлення у запропонованому апараті досягається вибором оптимальних параметрів руху пилогазової суміші в апараті.

Запропоновані авторами апарати знайшли широке застосування при пластичній і механічній матеріалів, в промисловості виробництва будматеріалів при виготовленні бітумоперліта, керамічної плитки, цементу, асфальтобетону, сірки, глинопорошка, сурику, шихти, калімагнезії, хлорвінілу, деревної й металевої стружки, і показали високу ефективність при невеликих енерговитратах.

Список літератури.

1. Батлук В.А., Сукач Р.Ю., Василів Р.М., Басов М.В. Принципово новий метод для очистки повітря від пилу //Матеріали доповідей на 7 міжнародній науково-методичній конференції “Безпека життєдіяльності людини – освіта, наука, практика”. Миколаїв; НУК, 2008 рік, с.179 - 182
2. Батлук В.А., Шелюх Ю.Є., Басов М.В., Василів Р.М., Сукач Р.Ю. Математические модели процессов разделения гетерогенных систем при пылеочистке //Вестник нац.тех.университета Украины “Киевский политехнический институт”. Машиностроение – К.,НТУУ «КПИ». – №52., 2008.,с.267 -272.
3. Батлук В.А., Батлук В.В., Мельников О.В. Один из путей решения проблем устранения промышленной опасности, создаваемой мелкодисперсной пылью//Юбилейные научные чтения “Белые ночи-2008” /Материалы Международных научных чтений Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности,Часть 2.-Изд-во МАНЭБ, СПб, 2008 - 491с., с.327-332.
4. Батлук В.А., Батлук В.В., Макачук В.Г. 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.