

ДИНАМІКА РУХУ ЧАСТИНОК У ВНУТРІШНІЙ ОБЛАСТІ СТАЦІОНАРНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКУ В ЦИКЛОНІ

Рассматриваются вопросы обеспечения высокоэффективными аппаратами очистки воздуха от пыли разных отраслей производства с целью доведения вредных выбросов их к санитарно-гигиеническим нормам. Приводятся новые направления создания аппаратов пылеочистки, базирующихся на использовании действия центробежно-инерционных сил, благодаря которым удалось значительно увеличить эффективность пылеулавливания.

The article is sacred to the questions of providing of cleaning of air high — efficiency vehicles from the dust of different industries of production with the purpose of leading to of harmful extrass them to the sanitary — hygenic norms. New directions of creation of vehicles of dust catching are pointed in the article, which are based on the use of action of centrifugal — inertia forces and due to which it was succeeded considerably to increase efficiency of dust catching

Постановка проблеми

Надзвичайно важливим чинником, що істотно впливає на територіальну організацію усього соціально-економічного життя і ефективність виробництва, є екологічний стан, який протягом останніх десятиліть в Україні істотно погіршилася. Чинники, що впливають на екологічний стан, є розвиток промисловості при застарілих технологіях і пов'язана з цим надмірна урбанізація багатьох районів. Основоположні постулати концепції сталого розвитку людства ґрунтуються на розумінні тісного взаємозв'язку екологічних, економічних і соціальних проблем, що змушує до об'єднання наукових розробок провідних фахівців академічних інститутів, зокрема, економіко-екологічних досліджень. З огляду на проблеми сьогодення екологічна задача є і вкрай необхідною, і надважкою, оскільки:

- по-перше, Україна на даному етапі свого розвитку перебуває в умовах важко прогнозованого перебігу трансформаційних процесів та реформування економіки;

- по-друге, первинні наукові підходи до розв'язання посталих проблем повинні враховувати як структурну різноплановість, так і багатогранність наукових прийомів, які б забезпечували комплексний підхід до розв'язання складних еколого-економічних проблем у всіх сферах життя суспільства — від визначення методологічних засад з розробки ефективної еколого-економічної політики держави до формування конкретних важелів та інструментів екологізації суспільного розвитку і раціонального природокористування на загальнодержавному, регіональному та секторальному рівнях.

Їх втіленню у життя має передувати реформування національної екології на інноваційних засадах і внесення суттєвих коректив у систему еколого-економічної політики, що обумовить необхідність радикальної перебудови адміністративно-управлінського, економічного та техніко-технологічного базису розвитку країни на засадах екоіновачійного підходу.

Таким чином, йдеться не тільки й не стільки про новий напрям в екологічній науці, але й про нову загальну систему світосприйняття і осмислення новітніх проблем взаємодії людини й природи, визначення місця людини й суспільства в природі, їх збалансованого розвитку.

Техногенне навантаження в Україні характеризується виключно високим рівнем і різноманітністю впливу на навколишнє природне середовище. Має місце недостатність уваги з боку суб'єктів господарської діяльності до проблем техногенної та екологічної безпеки. Випадки загибелі та травмування людей під час аварій трапляються у 5–8 разів частіше, ніж у розвинутих європейських країнах. Тому єдиним шляхом покращення стану техногенної та екологічної безпеки вбачається тотальна екологізація суспільства та удосконалення алгоритмів дій з ліквідації надзвичайних ситуацій з використанням міжнародних стандартів зі сфери управління, в першу чергу стандартів ISO 14001 та ISO 9000.

За останні 20 років від стихійних лих, техногенних аварій і надзвичайних ситуацій постраждало більше 1 млрд. людей, у тому числі 5 млн. загинуло, а спричинені матеріальні збитки обчислюються трильйонами доларів США.

В Україні щорічно виникає понад 60 тисяч надзвичайних подій техногенного характеру, у яких гине й травмується понад 6000 осіб. При цьому державі наносяться збитки більше як на 1 млрд. гривень.

Займаючи лише 2,7 % території колишнього СРСР, на якій проживало 18 % населення, Україна виробляла понад 17 % промислової та близько 22 % сільськогосподарської продукції, що обумовило велику концентрацію техногенно-небезпечних підприємств різноманітних напрямів господарської діяльності на одиницю площі території.

Техногенне навантаження в Україні характеризується не тільки високим рівнем, але і різноманітністю впливу на навколишнє середовище. Промислове виробництво в Ук-

раїні нараховує понад 1,8 тисяч хімічно небезпечних об'єктів, які зберігають, виробляють або використовують близько 300 тис. тонн різних шкідливих хімічних речовин, у тому числі понад 9,0 тис. тонн хлору, 200 тис. тонн аміаку та близько 100 тис. тонн інших небезпечних хімічних речовин. В Україні діє понад 1,5 тис. вибухо- та пожежо-небезпечних об'єктів, де зосереджено понад 13 млн. тон твердих і рідких вибухо- і пожежонебезпечних речовин.

У зонах можливого хімічного ураження цих об'єктів мешкає понад 17 млн. осіб, або 35 % населення країни. Більше 400 адміністративно-територіальних одиниць мають ступінь хімічної безпеки, з яких понад 90 адміністративно-територіальних одиниць віднесено до I ступеня хімічної безпеки (у зоні хімічного ураження знаходиться понад 50 % мешканців), більше 20 — до II ступеня хімічної безпеки (від 30 до 50 % мешканців), більше 70 (від 10 до 30 % мешканців) — до III ступеня, 245 (до 10 % мешканців) — до IV ступеня.

Одночасно має місце ситуація, коли суб'єкти господарської діяльності створюють і розташовують свої технологічні комплекси у густонаселених місцях, не зважаючи на безпеку, яку створюють ці підприємства.

І в цій низці питань вагомий внесок вносять підприємства, які викидають у навколишнє середовище колосальну кількість шкідливих речовин і пилу. Ось чому питання очистки повітря від пилу займає одне з головних завдань екологів всього світу. Основну роль у вирішенні цих проблем відводиться розробці високоефективних пиловловлювачів.

Отже, створення принципово нових апаратів сухого очищення повітря від пилу, які забезпечили б можливість високоефективного уловлення полідисперсного пилу при зменшенні гідравлічного опору і розмірів установок, становить значний теоретичний і практичний інтерес.

Аналіз останніх досліджень

П'ята частина шкідливих речовин, що викидається зі стаціонарних джерел, потрапляє в атмосферне повітря. Тому однією із основних проблем при вдосконаленні виробничих процесів є усунення або різке зменшення пилويدілення.

Особливо гостро стоїть проблема вловлення дрібнодисперсного пилу, який через малу густину розсіюється та пересувається на великі відстані потоками атмосферного повітря.

Суттєві підвищення вимог до систем очистки неминує призводить до ускладнення їх структури та значного збільшення комплектуючих апаратів. Складність апаратури різного призначення по кількості комплектуючих пристроїв зросла в останні роки в середньому в 2–3 рази. Ця тенденція зберігається і об'єктивно характеризує процес розвитку екології взагалі і апаратів очистки повітря від пилу зокрема.

Виникає протиріччя: з одного боку — потрібно суттєве підвищення потенційних можливостей систем очистки, з іншого боку — зросли труднощі в реалізації цих можливостей через недостатні експлуатаційні можливості апаратури.

Ускладнення систем пилоочистки при одночасному підвищенні вимог щодо ефективності їх роботи вимагає прийняття певних мір з розробки високоефективних апаратів пиловловлення.

Підвищення вимог до чистоти атмосферного повітря веде до необхідності вдосконалення засобів та апаратів пиловловлення. Вибір того чи іншого пиловловлювача — доволі складна задача, яка визначається фізико-хімічними властивостями пилоповітряної суміші, необхідними продуктивністю, ефективністю пиловловлення, економічністю процесу. Найбільш широке застосування знайшли апарати сухого обезпилювання. Вологі пиловловлювачі більш ефективні, ніж сухі, але при їх використанні виникає нова проблема — очистка забруднених стоків, тому їх використовують у тих випадках, коли інші методи малоефективні.

Одним з напрямків зменшення забруднення оточуючого середовища твердими викидами є одержання продуктів та напівпродуктів у гранульованому вигляді та у вигляді таблеток. Але там, де необхідна велика поверхня контакту фаз (сушіння, каталітичні, хімічні процеси тощо) забруднення навколишнього середовища викидами у вигляді пилу часто неминує. У цьому випадку намагаються вибрати найбільш ефективну схему пиловловлення, забезпечуючи при цьому мінімальні втрати пилоподібних матеріалів.

Методи пиловловлення поділяють на дві групи: газодинамічні та електричні. До газодинамічних методів відносять гравітаційні, інерційні, відцентрові, фільтраційні та струйні, до електричних — електрофільтраційні, електромагнітні та акустичні.

Розвиток та удосконалення сучасних установок для очистки повітря від пилу здійснюється через створення складних гігантів очисних споруд, до яких у певній кількості і послідовності входять як апарати "сухої" очистки, так і апарати "вологої" очистки, а також електричні апарати.

Метою даної роботи є підвищення ефективності, зменшення енерго- та металоємності відцентрово-інерційних пиловловлювачів і досягнення в них можливості однаково ефективно вловлювати пил з різними фізичними, хімічними та морфометричними якостями.

Виклад основного матеріалу дослідження

Пилоочистка відноситься до класу задач аеродинамічної класифікації, фізичними основами якої є принципи поділу потоків, що застосовуються при методах механічного відділення зваженого матеріалу в апаратах для уловлення пилу, циклонах, гідроциклонах і центрифугах.

На поділ потоків на частинку матеріалу в різних напрямках впливають дві сили: масова сила і сила потоку. Масова сила залежить від густини, прискорення і об'єму, тобто від третього ступеня характерного діаметра частинки. Сила потоку, навпаки, залежить від коефіцієнта опору, динамічного тиску, який обумовлений відносною швидкістю між частинкою і несучим середовищем, і площі перерізу частинки. Для коефіцієнта опору найважливішою характеристикою є число Рейнольдса. При цьому в разі спрощеного поділу, якщо знехтувати перехідною областю, утворюються дві зони: при невеликих числах Рейнольдса для

сили потоку дійсний закон Стокса, при великих — квадратичний закон опору.

Через те, що сила потоку залежить від першого або другого ступеня діаметру частинки, а сила інерції — від третього, то дрібніші частинки більш зазнають вплив сили потоку, а більші — масової сили. Якщо масова сила M і сила потоку S діють у протилежних напрямках, то для певного значення величини частинки, що позначається як межа поділу, існує рівновага між M і S . Густина частинок впливає лише на сили інерції, а межа поділу за інших однакових умов розташована тим нижче, чим вище щільність матеріалу, що піддається поділу.

Для здійснення технічного поділу потоків з великою точністю, коли кожна частинка знаходиться в зоні поділу дуже короткий час, у цій зоні повинні переважати однорідні умови поділу, тобто параметри, що діють на межі поділу, не повинні піддаватися ніяким змінам.

Аеродинамічна класифікація частинок у нашому випадку здійснюється в газодисперсному потоці. Найбільш інформативною є класифікація вловлюючих апаратів за видом альтернативних сил, які призводять до розсіювання частинок залежно від розміру. У аеродинамічних пиловловлювачах одна з таких сил — аеродинамічний опір частинок потоку, він пропорційний величині δ^α , де δ — розмір частинки, α — показник ступеня, який змінюється залежно від режиму обтікання від 1 до 2. Вочевидь, інша сила, що діє на частинку, повинна залежати від розміру в ступеню, що знаходиться за межами цього інтервалу. Зазвичай це масові сили різної природи, загальною для яких є пропорційність об'єму частинок, тобто величині δ^3 .

За взаємною орієнтацією аеродинамічної і масової сил пиловловлювачі можуть бути розділені на протипоточні, у яких альтернативні сили спрямовані в протилежні боки, тобто утворюють кут 180° , та інерційні.

У всіх інших випадках, коли альтернативні сили складають постійний або змінний кут, відмінний від 180° , навіть теоретична рівновага в апараті частинки будь-якого розміру неможлива. Визначальну роль тут грають нестационарні ефекти, частіше за все — сила інерції відносного руху. Тому подібні апарати називають інерційними.

В апаратах для очистки повітря реалізуються принципи як протипоточних пиловловлювачів, так і інерційних.

Математичні моделі складають основу методів розрахунку, оптимізації різних пиловловлювачів і прогнозування характеристик їх регулювання. У практиці математичного моделювання процесів аеродинамічної класифікації найбільш широко розповсюджені так звані детерміновані та стохастичні моделі.

Основу детермінованих моделей складає уявлення процесу як рух частинок, які не взаємодіють у стаціонарному потоці газу.

Квазістаціонарне наближення динамічних рівнянь руху є досить потужним інструментом теоретичного дослідження руху частинок у газових потоках, яке дозволяє, з одного боку, істотно спростити одержані рішення, а з іншого — зберегти усі основні ефекти взаємодії частинок з потоком, особливо, для умов рівноважної

класифікації, коли ϵ , щонайменше один стійкий врівноважений стан.

Детерміновані моделі дозволяють оцінити вплив визначальних факторів на деякі характеристики поділу (розмір рівноважної частинки, граничний розмір тощо), але не дозволяють отримати розрахункові вирази для кривих розділення, побудова яких можлива тільки на основі стохастичних моделей процесів класифікації, які враховують сукупний ефект від випадкових впливів з боку навколишнього середовища на кожен частинку.

Аналітичні формули для розрахунку кривих поділу є ефективним інструментом для якісного аналізу та математичного моделювання процесів класифікації, однак проблемним в їх практичному використанні є питання про визначення стохастичних параметрів, які залежать від пульсації повітря.

З вищенаведеного матеріалу випливає, що і детерміновані і стохастичні моделі процесів класифікації не враховують структуру турбулентного пилоповітряного потоку і специфіку руху частинок матеріалу різного дисперсного складу. У даний час теоретичні основи створення апаратів пиловловлення розроблено з позицій взаємодії потоку повітря і окремої частинки без урахування пульсаційних складових швидкості повітря і масштабів вихрових структур у потоках середовища транспортування, що обов'язково необхідно враховувати для забезпечення адекватності математичних моделей, які описують роботу пиловловлювачів.

Пилоповітряна суміш надходить тангенціально у корпус пиловловлювача через вхідний патрубок. Під дією відцентрових сил частинки пилу великої маси відкидаються до циліндричної частини корпусу апарату і рухаються зверху вниз під дією гравітаційних сил вниз спочатку вздовж циліндричної, а потім конічної частини його до патрубка виходу пилу в бункер.

Процес руху дрібних зважених частинок під дією відцентрової сили в турбулентному потоці складається з двох процесів: безперервного руху частинок до стінки пиловловлювача всередині пульсаційних вихорів, які їх несуть, і безладного за напрямом, частотою та амплітудою руху частинок разом з пульсаційними вихорами, які їх несуть.

Перший процес — безперервний рух частинок до стінки апарата, описується у стоксівському наближенні рівнянням (1), виведеним для випадку вільного руху частинок у стаціонарному ламінарному потоці. Рівняння руху стоксівської частинки радіуса R у криволінійному турбулентному потоці газу з кутовою швидкістю ω з урахуванням відцентрової сили, має такий вигляд:

$$dv/dt + bv = bV\sin\omega t - \omega^2 R \quad (1)$$

де v — швидкість руху частинки до стінки, m/c ; $V\sin\omega t$ — поперечна складова пульсації швидкості газу, m/c ; β — фактор інерційності частинки ($\beta = 1/\tau$); ω — лагранжева частота пульсації, m/c ; ϖ — кутова швидкість криволінійного турбулентного потоку газу, m/c ; R — радіус криволінійного турбулентного потоку газу, m .

Початкова умова $t = 0, v = 0$.

Розв'язком рівняння є

$$v = \frac{V \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} + \frac{\omega \tau V}{1 + \omega^2 \tau^2} e^{-t/\tau} - \tau \omega^2 R. \quad (2)$$

Для знаходження середнього значення швидкості руху частинки усереднимо рішення по періоду пульсацій. Перший — періодичний член у правій частині рівняння при цьому дає нуль, а другий — неперіодичний член для дрібних частинок з $\tau < T$ стрімко наближується до нуля і як нестационарна складова швидкості повинен бути відкинутий. У результаті для середньої швидкості руху частинок V_s до стінки циклону отримуємо вираз

$$V_s = \tau \omega^2 R. \quad (3)$$

Другий процес — хаотичний рух частинок разом з пульсаційними вихорами, що їх несуть, є проявом турбулентної дифузії частинок, інтенсивність якої залежить, як і швидкість їх руху під дією відцентрової сили, від маси частинок.

Оскільки ніяких перешкод між несучими пульсаційними вихорами немає, у результаті руху частинок до стінки апарата підвищується їх концентрація у цьому напрямку, проте, цьому процесу перешкоджають хаотичний рух вихорів, хоча їх періодичність і амплітуда у середньому одна і та сама, що пояснюється тим, що у вихорах, які рухаються від стінки, вміст завислих частинок вищий, ніж тих, які рухаються до стінки.

Зважаючи на появу пов'язаного з описаним ефектом зворотного дифузійного потоку частинок, ефективне значення швидкості руху частинок до стінки пиловловлювача у турбулентному потоці виявляється завжди нижче, ніж у ламинарному потоці і може знизитися майже до нуля.

Якщо частинки дуже малі і через це їх рух практично нічим не відрізняється від руху вихорів газу, які їх несуть, то для них має місце рівність коефіцієнтів турбулентної дифузії частинок D_i і середовища D_{ig}

$$D_i = D_{ig} \quad (4)$$

і дійсні всі закони турбулентної дифузії суцільного середовища:

- закон розсіювання (випадкового блукання) дифундуючих частинок

$$y^2 = 2D_i t, \quad (5)$$

відповідно до якого середнє квадратичне зміщення частинки пропорційне кореню квадратному з часу руху;

- феноменологічний закон дифузії (перший закон Фіка)

$$j = -D_i dc/dy, \quad (6)$$

згідно з яким дифузійний потік зважених частинок (j) через поверхню, яку розглядаємо, є пропорційним коефіцієнту дифузії і градієнту вагової або рахункової концентрації газу (c);

- закон конвективної дифузії частинок, який фіксує факт рівності кількості домішок, що вноситься у розглянутий елементарний об'єм рухомим потоком газу, і кількості домішок, що дифундують з нього при стаціонарному режимі.

Коефіцієнт турбулентної дифузії (D_i) визначається за формулою

$$D_i = \frac{V^2}{\omega^2 T} \quad (7)$$

де: V — амплітуда поперечної складової пульсації швидкості газу, m ; ω — лагранжева частота пульсацій, m/c ; T — період пульсацій, c .

Рівність нулю ефективного значення швидкості руху частинок до стінки пиловловлювача означає рівність зворотного дифузійного і відцентрового потоків. У цьому випадку їх алгебраїчна сума дорівнює нулю

$$cV_s + D_i dc/dy = 0, \quad (8)$$

звідки після інтегрування з граничною умовою $y = y_0$, $c = c_0$ маємо

$$c = c_0 + [\exp(-yV_s/D_i) - \exp(-y_0V_s/D_i)]. \quad (9)$$

Якщо частинки грубодисперсні, то процес їх руху під дією відцентрової сили складається інакше. Маючи високу відцентрову швидкість, вони в процесі руху не залишаються всередині вихідного вихору газу, а залишають його, перетинаючи безліч інших вихорів, що випадково зустрілись. При цьому:

а) швидкість відцентрового руху частинок виявляється нижчою через порушення стоксівського лінійного закону опору частинок;

б) значення коефіцієнта турбулентної дифузії частинок виявляється нижчим через зменшення дифузійного

кроку ($\frac{V}{\omega}$), яке спричиняється переходом частинки до іншого вихора.

Частинки пилу меншої маси, які не можуть досягти поверхні стінки циліндричної частини корпусу через опір повітря, рухаються до жалюзійного відокремлювача, де відбувається вторинне очищення повітря при проходженні його через отвори між жалюзі, де воно огинає жалюзі, а тверді частинки пилу через свою інертність ударяються об них, відбиваються (кількість зіткнень залежить від маси частинки) і рухаються також до пиловипускного патрубку.

Для математичного опису процесу пилоочистки необхідно розробити математичні моделі руху двофазних дисперсних турбулентних течій у пристінній області стаціонарного турбулентного потоку як у циліндричній частині корпусу, так і поблизу жалюзійного відокремлювача.

Розрахунок двофазної течії повинен включати моделювання переносу маси та імпульсу для кожної з фаз, а також міжфазної взаємодії. Основні принципові труднощі, що виникають при побудові теорії двофазних дисперсних турбулентних потоків, пов'язані з турбулентним характером руху середовища і взаємодією частинок як між собою так і з обмежуючими поверхнями. Необхідно відзначити, що до теперішнього часу знаходиться далеко від завершення навіть побудова теорії однофазних турбулентних потоків.

Існуючі методи розрахунку двофазних дисперсних турбулентних течій можна розділити на дві групи. До першої групи належать роботи, основані на лагранжевому траєкторному описі дисперсної фази — вирішенні рівнянь руху і енергії поздовж траєкторій окремих частинок.

Облік у рамках такого підходу випадкового характеру руху частинок, обумовленого взаємодією з турбулентними вихорами несучого потоку, в результаті інтегрування динамічних стохастичних рівнянь типу Ланжевена вздовж індивідуальних траєкторій з подальшим осередненням рішень на основі початкових даних призводить до істотного збільшення обсягу розрахунків через те, що для отримання статистично достовірної інформації необхідно використовувати досить представницький набір реалізацій.

Детермінований лагранжевий опис руху дисперсної фази у турбулентному потоці на підставі розв'язку рівнянь тільки для середніх величин, тобто без урахування взаємодії з випадковими полями пульсацій швидкості, може бути виправданим (хоча і не завжди) тільки для дуже інерційних частинок, час релаксації яких набагато більший інтегрального масштабу турбулентності і які через те слабо залучаються до турбулентного руху. Зі зменшенням розміру частинок репрезентативне число реалізацій має зростати, оскільки збільшується внесок взаємодії частинок з вихорами все менших розмірів.

Трудомісткість динамічного лагранжевого моделювання значною мірою збільшується у висококонцентрованих дисперсних потоках внаслідок зростання «заплутаності» траєкторій через зіткнення частинок, а також при зміні числа (народження або зникнення) частинок у результаті коагуляції, дроблення, спонтанного перетворення тощо. Лагранжевий траєкторний підхід дозволяє отримувати детальну інформацію про взаємодію частинок з турбулентними вихорами, зі стінками і одне з одним, однак вимагає дуже великих витрат часу при розрахунках складних течій, що зустрічаються у природних або промислових умовах.

Інший метод моделювання засновано на ейлерівському континуальному описі обох фаз — на так званих дво-рідинних моделях у рамках механіки взаємопроникних гетерогенних середовищ.

Істотною перевагою ейлерівського континуального підходу в порівнянні з лагранжевим траєкторним моделюванням є використання балансних рівнянь одного типу для обох фаз і, відповідно, єдиного алгоритму розв'язання всієї системи рівнянь. Крім того, опис динаміки надзвичайно дрібних частинок не викликає ніяких принципівих труднощів, через те що при прагненні маси частинки до нуля здійснюється граничний перехід до задачі про турбулентну дифузію безінерційної (пасивної) домішки. І, нарешті, облік зіткнень і зміни числа частинок у рамках континуального підходу не призводить до такого значного зростання обсягу і ускладнення розрахунків, як при лагранжевому моделюванні.

У цілому, лагранжевий траєкторний і ейлерівський континуальні методи моделювання доповнюють одне одного, але кожний з них має свої переваги і недоліки і, отже, свої галузі застосування. Лагранжевий метод можна застосовувати для істотно невірноважених течій (великі інерційні частинки, розріджені дисперсні середовища), а ейлерівський метод справедливий в умовах, близьких до рівноважних (дрібні малоінерційні частинки, кон-

центровані дисперсні середовища). Оскільки дисперсна фаза має одночасно властивості континууму і дискретних частинок, ситуація з цими двома підходами трохи нагадує відомий дуалізм «хвиля-частинка» у мікросвіті. Запропоновано гібридний лагранжево-ейлерівський метод, що поєднує детальність лагранжевого і ефективність ейлерового підходів до опису дисперсної фази.

Найточніша і детальніша інформація про структуру турбулентного двофазного потоку може бути отримана на основі застосування методу прямого моделювання для несучого суцільного середовища у поєднанні з лагранжевим стохастичним підходом для дисперсної фази. При прямому моделюванні описується весь спектр турбулентних вихорів, включаючи дрібномасштабні, які відповідають за дисипацію енергії турбулентності. У методі великих вихорів проводиться пряме моделювання тільки великих вихорів, просторовий масштаб яких перевищує розмір чисельної сітки, а дрібномасштабні (підсіткові) моделі опиняються поза межею розв'язки та описуються напівемпіричним шляхом. Метод великих вихорів застосовується для моделювання поведінки частинок, час динамічної релаксації яких набагато більший тимчасового мікомасштабу турбулентності (Armenio et al. 1999; Boivin et al. 2000; Yamamoto et al. 2001; Kuerten & Vreman, 2005; Fede & Simonin, 2006). Це обмеження випливає з вимоги, щоб внесок підсіткових флуктуацій (тобто дрібномасштабної турбулентності) до статистики дисперсної фази був би значно менший і визначальну роль відігравала взаємодія частинок з великомасштабними енергомісткими турбулентними вихорами. Однак навіть застосування методу великих вихорів для суцільного середовища у поєднанні з лагранжевим стохастичним підходом для дисперсної фази все одно може виявитися малоефективним методом для практичних цілей через необхідність обробки великих обсягів інформації, що є надзвичайно дорогим інструментом. Тому в низці робіт (Druzhinin & Elghobashi, 1998; Ferry & Balachandar, 2001, 2005; Pandya & Mashayek, 2002a; Rani & Balachandar, 2003; Kaufman et al., 2004; Moreau et al., 2005) розвиваються перспективні методи, які засновано на використанні двох методів у рамках континуального двофазного підходу. Ефективним базисом для розвитку прямих континуальних і комбінованих лагранжево-ейлерівських методів моделювання дисперсних течій є теоретичний формалізм, що полягає у розкладанні поля швидкості частинок у турбулентному потоці на «коррельовану» і «квазіброунівську» складові швидкості (Simonin et al., 2002; Fevrier et al., 2005).

При моделюванні руху частинок у розрідженому дисперсному середовищі, тобто при невеликій об'ємній концентрації дисперсної фази, основна увага повинна приділятися взаємодії частинок з турбулентними вихорами несучого потоку, оскільки роль взаємодії частинок між собою незначна. Однак з підвищенням концентрації та розміру частинок зростає внесок міжчастинкових взаємодій у перенесенні імпульсу і енергії дисперсної фази. Хаотичний рух частинок, який обумовлено їх взаємодією, отримав назву псевдотурбулентності (щоб відрізнити від турбулентного руху частинок, пов'язаного з їх залучен-

ням у турбулентний рух несучого потоку). Причиною виникнення псевдотурбулентних флуктуацій може бути гідродинамічна взаємодія між частинками, що реалізується за допомогою обміну імпульсом та енергією з випадковими полями швидкості і тиску навколишнього середовища (Buyevich, 1972b; Koch, 1990) і безпосередня взаємодія у результаті зіткнень. Зі зростанням концентрації і розміру частинок роль обміну імпульсом та енергією між частинками у результаті зіткнень у порівнянні з гідродинамічною взаємодією зростає. Процеси взаємодії частинок з турбулентними вихорами і міжчастинкових зіткнень можна вважати статистично незалежними тільки у випадку надзвичайно інерційних частинок, час динамічної релаксації яких набагато більший характерного часу взаємодії з турбулентними вихорами і тому їх відносний рух некорельований і аналогічний хаотичному руху молекул. У разі малоінерційних частинок необхідно враховувати взаємний вплив взаємодій «частинка-турбулентність» і «частинка-частинка».

Як уже зазначалося, розрахункові труднощі лагранжевого траекторного моделювання різко зростають зі збільшенням концентрації дисперсної фази, що пов'язано, в першу чергу, з необхідністю одночасного розрахунку траекторій надзвичайно великого числа частинок, які беруть участь у ситуації, що розігрується. Ефективний спосіб подолання цих труднощів було запропоновано Oesterle & Petitjean (1991, 1993), Sommerfeld & Zivkovic (1992), Sommerfeld (1999) шляхом заміни колективу частинок, що стикаються, моделюванням руху зразкової частинки з введенням щільності ймовірності зіткнень з фіктивними (віртуальними) частинками.

Ефективним підходом для моделювання зіткнень частинок є також застосування методу Монте-Карло (Tanaka et al., 1991; Fede et al., 2002; Moreau et al., 2004). Однак і в цих підходах зі збільшенням концентрації частинок необхідна кількість розрахункових траекторій для отримання статистично достовірного процесу реалізацій має зростати. Відтак сфера застосування ейлерівського континуального методу моделювання розширюється зі зростанням концентрації дисперсної фази, коли збільшується частота міжчастинкових зіткнень.

Базуючись на наведених вище положеннях, нами запропоновано принципово нову конструкцію пиловловлювача, жалюзійний відокремлювач в якій складається з трьох секцій з певними конструктивними особливостями кожної. Щоб розрахувати конструктивні розміри апарата, нами створено матрицю планування експериментів і результати їх обробки. Коефіцієнти регресивного рівняння при дисперсії адекватності $S^2 = 0,031842$ та середньоквадратичному відхиленні $S = 0,178444$.

На основі цих даних побудовано графіки залежності ефективності роботи апарата із зміною кута атаки жалюзі з дном (рисунки 1–5).

Висновки та перспективи подальших досліджень

Дослідження динаміки руху частинок у внутрішній області стаціонарного турбулентного потоку в пиловловлювачі довели, що сфера застосування ейлерівського кон-

тинуального методу моделювання розширюється зі зростанням концентрації дисперсної фази, коли збільшується частота міжчастинкових зіткнень. Створено математична модель процесу сепарації у відцентрово-інерційних пиловловлювачах, теоретично досліджено аеродинамічну структуру газового потоку, проведено математичні траекторні дослідження відцентрово-інерційних пиловловлювачів, що дозволило промоделювати процеси, які відбуваються у відцентрово-інерційних пиловловлювачах. Аналіз інтенсивності пульсацій швидкості та концентрації частинок на стінці при різних значеннях параметра інерційності (розміру частинок) дозволяє запропонувати нову конструкцію відцентрово-інерційного пиловловлювача зі зміною кута атаки і кількості жалюзі.

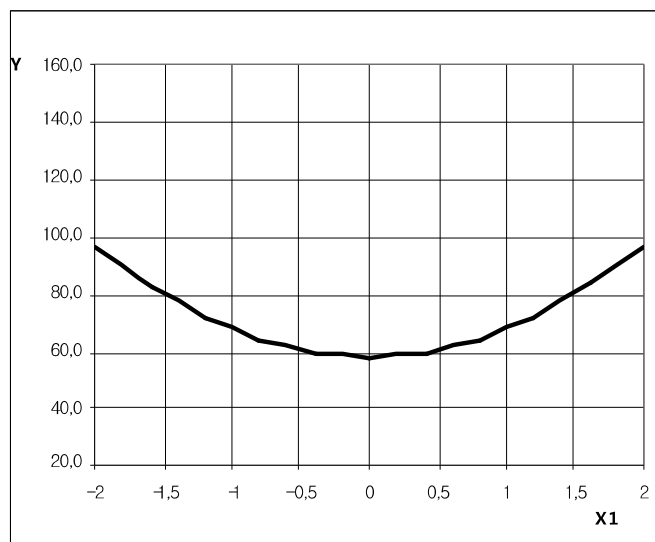


Рисунок 1 — Залежність гідравлічного опору апарата зі зміною кута атаки жалюзі з дном від кута атаки жалюзі у першій секції.

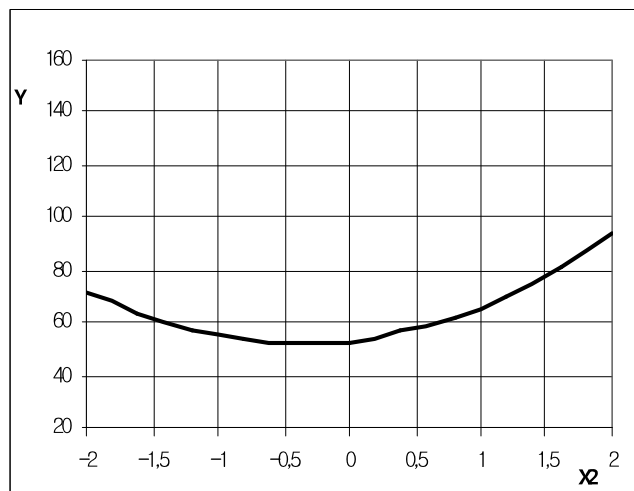


Рисунок 2 — Залежність гідравлічного опору апарата зі зміною кута атаки жалюзі з дном від кута атаки жалюзі у другій секції.

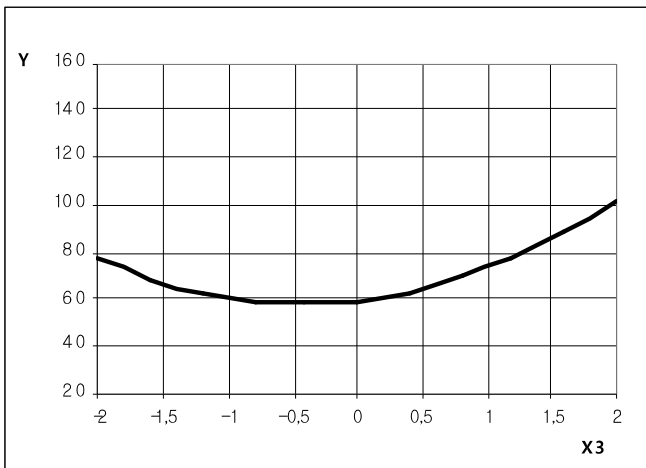


Рисунок 3 — Залежність гідравлічного опору апарата зі зміною кута атаки жалюзі з дном від кута атаки жалюзі у третій секції.

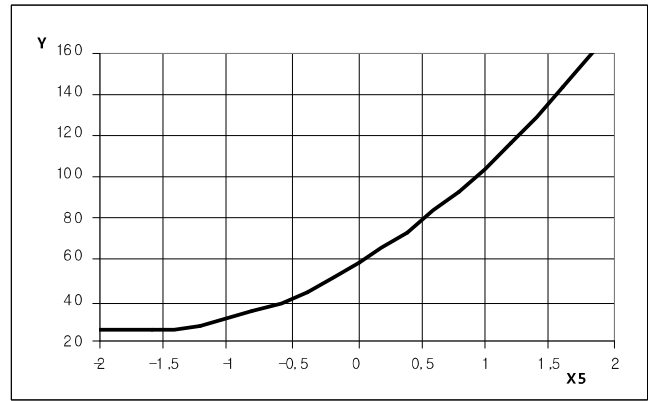


Рисунок 5 — Залежність гідравлічного опору апарата зі зміною кута атаки жалюзі від витрат повітря.

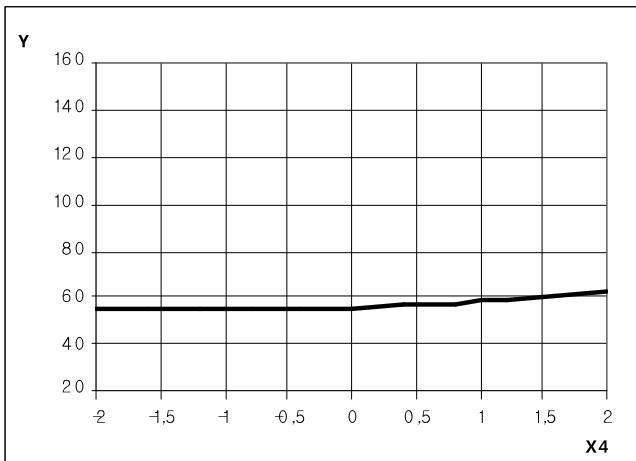


Рисунок 4 — Залежність гідравлічного опору апарата зі зміною кута атаки жалюзі з дном від медіанного діаметру пилу.

Література

1. Батлук, В.А. A mathematical model of vacuum cleaners, taking into account the motion of particles near the wall part of the dust collector / В.А.Батлук, В.В. Батлук, В.Г. Макаревич // Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power industry in Agriculture 12/2010, Lublin, pag. 97 — 105.
2. Батлук, В.А. The Problem of Highly Effective Cleaning of air from dust / В.А.Батлук, В.В. Батлук, В.Г. Макаревич // Motrol motoryzacja I energetyka rolnictwa motorization and power in Agriculture 11/2009, Lublin, pag. 26 — 31.

Надійшла 14.03.2012 р.