

# Прикладна гідромеханіка, гідромашини і гідропневмоагрегати

УДК 621.928.9

В.А. Батлук д-р техн. наук,  
В.М. Климець,  
Е.Д. Бочкало

Національний університет “Львівська політехніка”  
Львівський державний університет безпеки життедіяльності, Львів, Україна

## ЗНИЖЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПИЛУ НА ЕЛЕВАТОРАХ

### REDUCTION OF DUST CONCENTRATION ON THE ELEVATOR

Вибух пилу в закритому просторі створює надлишковий статичний тиск, який в 12,5 разів перевищує точку руйнування залізобетонної плити. На результативнішим методом уникнення небезпечних ситуацій є розробка методів та способів зниження концентрації пилу, що і запропоновано у вигляді створення високоефективних і низькоенергетичних апаратів для вловлення дрібнодисперсних фракцій пилу.

#### Постановка проблеми

За даними ЦНДІпромзернопроект, у період з 1993 по 2011 рік на підприємствах галузі хлібопродуктів, розташованих на території України, зареєстровано 195 вибухів; у період з 1988 по 2009 рік загинуло 144 людини, травмовано 416.

Підприємства по зберіганню і переробці зерна увійшли до числа найбільш небезпечних галузей промисловості країн колишнього СРСР. Проте суттєвих заходів не було прийнято, про що свідчить статистика.

На території України щороку відбувається біля 10 первинних пилових вибухів на підприємствах збереження та переробки зерна. Аварійні ситуації, що виникають на таких об'єктах, як правило, спричиняють не лише значні матеріальні збитки, але й призводять до людських жертв.

Отже, проблема забезпечення безпеки складського господарства підприємств зберігання зерна є актуальну. Вирішення цієї проблеми дозволить істотно скратити збитки і уникнути нещасних випадків.

Перевищення допустимих антропогенних навантажень на навколошне середовище знижує рівень екологічної безпеки. Викиди пилу значно погіршують екологічний стан довкілля, викликають передчасне зношення промислового обладнання та об'єктів житлово-комунального господарства, чинять шкоду здоров'ю людей. Ось чому особливо гостро стоїть проблема вловлення дрібнодисперсного пилу, який через малу густину розсіюється та легко пересувається на великі відстані потоками атмосферного повітря.

Суттєве підвищення вимог до систем очистки неминуче призводить до ускладнення їх структури та різкого збільшення комплектуючих апаратів. Складність апаратури різного призначення по кількості комплектуючих пристройів зросла за останні роки у середньому в 2-3 рази. Така тенденція зберігається та об'єктивно характеризує

процес розвитку очищення екології взагалі і апаратів очистки повітря від пилу зокрема.

Виникає протиріччя: з одного боку, необхідність підвищення потенційних потужностей систем очистки, з іншого боку — зростають труднощі через експлуатаційні можливості апаратури при її застосуванні.

Значне зниження середньорічної концентрації пилу спостерігалось за останні 5 років в основному за рахунок падіння обсягів промислового виробництва. Водночас у деяких містах спостерігалося збільшення середньорічної концентрації пилу. В низці областей ситуація залишається досить небезпечною.

Ускладнення систем пилоочистки при одночасному підвищенні вимог щодо ефективності їх роботи вимагає прийняття певних заходів по розробці високоефективних апаратів пиловловлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій довів, що і в даний час одним з найбільш ефективних принципів відділення аерозольних частинок від газового потоку з метою підвищення якості та технологічних особливостей останнього, є використання апаратів із закрученими потоками. Велика кількість робіт по цій тематиці зумовлена використанням специфічних якостей закрученого потоку в різних технологічних процесах (розпилення, розділення, переробка сипучих матеріалів, сировини, передипання, тепло- і масообміни).

Проведений аналіз свідчить, що на сьогодні недостатньо розглянуто питання математичного моделювання процесів, методики розрахунку і конструктування пиловловлювачів відцентрового типу, що не дозволяє не тільки їх порівняти, але і прогнозувати енергетичні показники і ефективність роботи на різних стадіях проектування. Багато важливих з теоретичного і практичного боків питань аеродинаміки закручених потоків вивчено недостатньо, а вибір пиловловлюючого обладнання проводиться здебільшого інтуїтивно [6,7].

Фізичні особливості закручені потоків визначаються закономірностями процесів, які в них відбуваються, тому застосовувати концепцію та використовувати з цією метою звичайних осьових течій для закручені потоків на основі принципу “випрямлення” ліній току зазвичай неможливо.

Створення математичної моделі руху частинок у криволінійному каналі в осесиметричному потоці, в тому числі стосовно відцентрово-інерційних пиловловлювачів принципово нового типу, визначення конструктивних розмірів цих апаратів за допомогою математичної моделі апарату і підтвердження експериментальним шляхом, встановлення впливу конструктивних параметрів пиловловлювачів на ефективність роботи установки і її гідродинамічний опір, узагальнення даних, розробка рекомендацій і методик розрахунку та проектування апаратів із параметрами заздалегідь спрогнозованими (ефективність, опір, габаритні розміри тощо) є актуальною науковою і практичною задачею.

## Постановка завдання

В основу дослідження покладено завдання створення пиловловлювача, в якому за рахунок використання принципів аеродинамічного розділення двофазних систем за допомогою певної конструкції жалюзійного відокремлювача можна поліпшити гідродинамічні умови роботи апарату, що у свою чергу призведе до підвищення ефективності його роботи і зменшення гідравлічного опору.

## Виклад основного матеріалу дослідження

Базуючись на математичній моделі відцентрово-інерційних пиловловлювачів із ступеневим відокремлювачем і на конкретній конструкції такого апарату [2], розроблено принципово нові типи пиловловлювачів, які суміщають в одному корпусі два ступені очищення: перший циклонний — на половині оберту потоку після входу до апарату під дією відцентрової сили, і другий інерційний — при проходженні потоку через щілини між жалюзі відокремлювача, який встановлено коаксійно корпусу.

Було обрано циліндрично-конічну форму корпусу, довжина якого для пилу з медіанним діаметром дорівнює  $8 \text{ мкм} = 925 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $32 \text{ мкм} = 825 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $50 \text{ мкм} = 725 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Довжина циліндричної частини корпусу апарату складає для пилу з медіанним діаметром:  $8 \text{ мкм} = 800 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $32 \text{ мкм} = 700 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $50 \text{ мкм} = 600 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , а кут при вершині конуса дорівнює  $15^\circ$ . Дослідження прозорої моделі, яку наведено вище, конструкції відцентрово-інерційного пиловловлювача в аеродинамічній трубі довели, що значно підвищити ефективність їх роботи можливо при дотриманні умов постійності швидкості руху пилогазової суміші як в корпусі апарату, так і при проходженні через щілини між жалюзі відокремлювача, що і було використано при конструкціонній принципово нових апаратів.

На рисунку 1 запілене повітря через вхідний тангенційний патрубок 1 потрапляє всередину корпуса 2, де здійснює гвинтоподібний рух зверху донизу. Всередині

корпусу 1 пилоповітряний потік здійснює спочатку 1-2 оберти навколо вихлопного патрубку очищеного повітря 3, де під дією відцентрових сил відбувається пошарове розділення потоку. Великі частинки пилу відкидаються до стінки корпусу 2 і під дією сил ваги спускаються вздовж неї вниз у напрямку до пиловипускного патрубка 4.

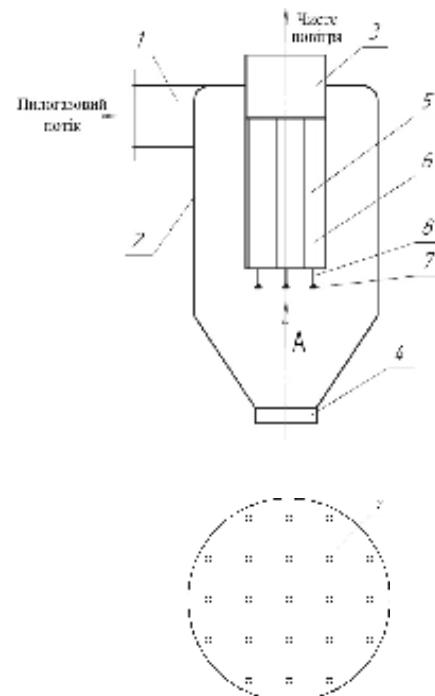


Рисунок 1 — Схема пиловловлювача

Очищений таким чином пилоповітряний потік далі надходить до простору між корпусом 1 і жалюзійним відокремлювачем 5. Дрібніші частинки пилу, не виділені з потоку відцентровою силою, підхоплюються потоком повітря і рухаються до жалюзійного відокремлювача 5. При цьому потік повітря робить різкий поворот малого радіусу (на кут більший  $90^\circ$ , але менший  $180^\circ$ ) і проходить крізь щілини між жалюзі 6, а потік дрібніших частинок пилу через силі інерції мають більший радіус повороту і не встигають за ним, пролітають мимо щілин, стикаються з жалюзі і в результаті або відбиваються від них, або рухаються поздовж їх поверхні зверху донизу.

Треба зауважити, що в жалюзійному відокремлювачі 5 жалюзі 6 встановлено таким чином, щоб між ними не було отвору паралельно до осі відокремлювача для того, щоб пилогазовий потік, проходячи через першу жалюзі, зустрічав перешкоду у вигляді наступної жалюзі.

При цьому необхідно, щоб загальна площа живого перерізу жалюзійного відокремлювача 5 перевищувала площину поперечного перерізу площини між корпусом пиловловлювача 2 і зовнішньою поверхнею жалюзійного відокремлювача 5, в результаті при русі пилоповітряної суміші тиск  $P_1$  всередині жалюзійного відокремлювача нижчий за тиск  $P_2$  між корпусом і зовнішньою поверхнею відокремлювача.

Розглянемо процес розділення двофазних середовищ на прикладі двох будь-яких послідовно розташованих жалюзі 6.

При русі повітря з частинками пилу вздовж осі апарату зверху донизу потік плавно обтікає зовнішню поверхню жалюзі 6. Зовнішній шар потоку, "зрізаний" наступними жалюзі, за рахунок різниці тисків проходить у щілині між ними. Зміна напрямку руху з осьового на радіальний (на кут більше  $90^\circ$  але менше  $180^\circ$ ) призводить до виникнення сил, які діють на частинки, які направлено на рівні кожноЯ жалюзі до стінки корпусу апарату, заганяючи частинки пилу до основного потоку і не дозволяючи їм разом з повітрям потрапляти у щілину.

Більше того, обтікання гострого ребра жалюзі 6 потоком призводить до утворення зони відризу ("кишеньки"), в якій утворюється торовий вихор. Торовий вихор має стійку форму через узгодження її з потоком і слабкість протитоків, він підживлюється енергією потоку, тому він і є найважливішим фактором, який протидіє потраплянню частинок у щілини між жалюзі, включаючи і дрібнодисперсні частинки.

У міру проходження пилоповітряного потоку через жалюзійний відокремлювач 5, тверді частинки пилу концентруються біля внутрішньої стінки корпусу апарату і, рухаючись гвинтоподібно зверху донизу навколо відокремлювача 5, виводяться через пиловипускний патрубок 4 до бункера. Очищено повітря, проходячи через жалюзійний відокремлювач, створює потік і направляється для використання або утилізації у вихлопний патрубок 3 очищеного повітря.

Аеродинамічний ефект розділення в апараті виникає при певній мінімальній швидкості повітряного потоку, подібно до того, як виникають підйомні сили при розгоні літака по злотній смузі. При швидкостях, нижчих мінімальних, апарат працює як звичайний відцентрово-інерційний пиловловлювач і ефективність його роботи різко зменшується. Верхня межа швидкості пилоповітряного потоку практично обмежується вибором оптимального аеродинамічного опору апарату, який після певного значення різко збільшується.

Було проведено експериментальні дослідження з визначення кута при вершині конуса відбивних кульок 7 на стандартному експериментальному стенду Львівського державного університету безпеки життєдіяльності на апараті, що запропонуваний, при витратах повітря —  $3000 \text{ м}^3/\text{годину}$ , на стандартному пилу (кварцевий пісок). Було встановлено, що для всіх розмірів пилу оптимальним кутом при вершині конуса відбивача 7 є кут у  $30^\circ$ , що підтверджує математичну модель процесу пиловловлення в запропонованому пиловловлювачі.

Проведені експериментальні випробування запропонованого пиловловлювача із відбиваючими конусами з різною формою відбиваючих кульок 7: квадратною, конусною з кутом донизу, конусною з кутом донизу кулеподібною, у вигляді: плоскої пластини, трикутної, хрестоподібної, форми куба.

Максимальна ефективність уловлення пилу досягається при формі відбиваючих кульок 7 у вигляді конуса з кутом при вершині, направленому доверху в напрямі патрубка очищеного повітря 3.

На експериментальному стенду на кварцевому пилу з медіанним діаметром ( $32$  і  $50$ )  $10^{-6} \text{ м}$  визначили довжину

ланцюжків 8, на яких закріплена відбиваюча конуси відносно конічної частини корпусу апарату 7:  $1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6$ . Було доведено, що виконання довжини ланцюжків 8, на яких закріплено відбиваючі конуси 7 такою, що дорівнює  $1/3$  довжини конусної частини корпусу апарату є оптимальним. На експериментальному стенду проведено порівняльні дослідження запропонованого пиловловлювача із відбиваючими конусами з еталонним апаратом на стандартному експериментальному пилу — кварцовому піску.

Порівнюючи одержані залежності з результатами дослідження еталонного апарату, встановлено, що застосування запропонованої конструкції пиловловлювача дозволило підвищити ефективність уловлення пилу на 1-2%, зменшивши при цьому енерго- та металоємність. Це пояснюється виконанням відбиваючих конусів на дні жалюзійного відокремлювача, яке призводить до покращення аеродинамічних характеристик пиловловлювача і зведенням до мінімуму впливу вторинного вихору на процес очистки.

Переваги пиловловлювача із відбиваючими конусами:

- стабільність роботи при мінімальних експлуатаційних витратах;
- низькі капітальні витрати;
- безперервність процесу пиловловлення і відводу пилу;
- працездатність у широкому діапазоні температур і в агресивному середовищі;
- висока стійкість системи;
- невеликі габарити і матеріалоємність;
- багатоваріантність способів монтажу (вертикальному, горизонтальному і нахиленому стані);
- сумісність з існуючими газоходами і будь-якими пристроями газопилоочищення;
- гранично висока ефективність пилоподавлення, коефіцієнт знепилювання джерел пиловиділення складає 93,9%, концентрація пилу не перевищує ГДК ( $4 \text{ мг}/\text{м}^3$ ) — коефіцієнт аеродинамічного опору в 1,5–2 рази менше значення еталонного апарату;
- градієнти тисків систем пиловловлення, які реалізують зустрічні швидкісні потоки повітря, перевищують швидкості витання "важких" фракцій пилу.
- мінімізована енергоємність, питома витрата потужності знепилювання на 60% менше традиційних аспіраційних установок;
- застосування "жорстких" аеродинамічних характеристик вентиляторів підтвердило енергетичний ККД на 20%;
- зменшення протяжності повітроводів зменшує втрати повного тиску на 40%;
- застосування засобів дроселювання, шлюзування джерел пиловиділення зменшує на 40% обсяг, інтенсивність пилоповітряних потоків пропорційно потужності;
- зменшення енергії на переміщення повітряних потоків.

При моделюванні руху частинок у розрідженному дисперсному середовищі, тобто при невеликій об'ємній концентрації дисперсної фази, основну увагу потрібно приділяти взаємодії частинок з турбулентними вихорами несучого потоку, оскільки роль взаємодії частинок між собою незначна. Однак з підвищеннем концентрації та

розміру частинок зростає внесок міжчасткових взаємодій у перенесення імпульсу і енергії дисперсної фази. Хаотичний рух частинок, спричинений їх взаємодією, отримав назву псевдотурбулентності (щоб відрізняти від турбулентного руху частинок, пов'язаного з їх залученням до турбулентного руху несучого потоку). Причиною виникнення псевдо-турбулентних флуктуацій може виявлятися як гідродинамічна взаємодія між частинками, що реалізується за допомогою обміну імпульсом та енергією з випадковими полями швидкості і тиску навколошнього середовища, так і безпосередня взаємодія через зіткнення. Зі зростанням концентрації і розмірів частинок роль обміну імпульсом та енергією між частинками через зіткнення у порівнянні з гідродинамічною взаємодією зростає. Процеси взаємодії частинок з турбулентними вихорами і міжчастковими зіткненнями можна вважати статистично незалежними тільки у випадку дуже інерційних частинок, час динамічної релаксації яких набагато більший характерного часу взаємодії з турбулентними вихорами і тому їх відносний рух є некорельованим і аналогічний хаотичному руху молекул. У разі малоінерційних частинок необхідно враховувати взаємний вплив взаємодії “частинка–турбулентність” і “частинка–частинка”.

Обчислюальні труднощі лагранжевого траекторного моделювання різко зростають зі збільшенням концентрації дисперсної фази. Це пов'язано, у першу чергу, з необхідністю одночасного розрахунку траекторій дуже великого числа частинок, що беруть участь у ситуації, яка розігрується. Ефективним способом подолання цих труднощів є шлях заміни колективу частинок, що рухаються, моделюванням руху зразкової частинки з введенням ймовірності зіткнень з фіктивними (віртуальними) частинками. Ефективним підходом для моделювання зіткнень частинок є також застосування методу Монте-Карло. Однак і в цих підходах зі збільшенням концентрації частинок необхідна кількість розрахункових траекторій для отримання статистично достовірного ансамблю реалізацій має зростати. Тому сфера застосування Ейлерова континуального методу моделювання розширяється зі зростанням концентрації дисперсної фази, коли збільшується частота міжчасткових зіткнень [5].

## Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведений теоретичний аналіз і запропонована модель дозволяють:

- розкрити фізичну сутність руху повітря, що очищається у проектованому апараті, визначити вплив діючих на частинку сил у радіальному напрямі на характер її руху;
- значно знизити кількість експериментальних досліджень з вивчення впливу параметрів апарату на ефективність очищення повітря й провести їх цілеспрямовано;
- створити принципово нові конструкції відцентрово-інерційних вихрових пиловловлювачів.

Подальшу роботу в цьому напрямі необхідно вести шляхом вдосконалення конструкції жалюзійного відокремлювача як другого ступеня очищення, корпусу апарату в плані оптимізації габаритних розмірів і вдоскона-

лення процесів розділення з метою подальшого підвищення ефективності пиловловлення, створення нових енергозберігаючих технологій і охорони навколошнього середовища.

## Література

1. Батлук, В.А. Зниження концентрації пилу як один із шляхів зниження пожежо-вибухонебезпечних факторів промислових викидів пилу / В.А. Батлук, Н.М. Козира, Климець В.В. // Зб. наукових праць: Тринадцята наук. конф. “Львівські хімічні читання-2011”. — 522 с.
2. Batluk, V.A., Azarskiy, K.I. Mathematical software for selection of optimal equipment for cleaning air from dust with the aid of computers // Ukrainian journal of medical engineering and technology. — K., 2000. — №2. — P. 92—94.
3. Батлук, В.А. Математичне моделювання траєкторій руху частинки пилу у пиловловювачі з жалюзійним відокремлювачем / В.А. Батлук, Н.М. Козира, В.В. Климець.— Промислова гіdraulika і пневматика. — 2011. — № 4(38). — С. 30—34.
4. Батлук, В.А. Математичне моделювання процесів, які відбуваються у пиловловювачі з жалюзійним відокремлювачем, що обертається./ В.А. Батлук, М.В. Басов, В.В. Климець // XVII Міжнародна наук.-техн. конф. “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”. Черкаси, 17-20 квітня 2012 — 160 с.
5. Пиловловлювач із відбиваючими конусами / Батлук В.А., Климець В.В.; Патент на корисну модель № 50265. Заявка № и200914008В01Д45/00 від31.12.2009.

## Reference

1. Batluk, V.A., Basov, M.V., Klymets, V.V. Tht issue of cleaning the air of dust in modern energysaving technologies in construction // Motrol otoryzaea i energetyka rolnictwa, motorization and power industry in Agriculture 13 D/ 2011. — Lublin. — p. 57—62.
2. Batluk, V.A., Azarskiy, K.I. Mathematical software for selection of optimal equipment for cleaning air from dust with the aid of computers // Ukrainian journal of medical engineering and technology. — K., 2000. — №2. — P. 92—94.
3. Batluk, V.A. Mathematical models of the processes of separation of heterogeneous systems in dust cleaning // International scientific practical conference «New machines for manufacture of bilding materials and constructions, modern bilding technologies». — Poltava. — 2000. — p. 87—91.
4. Batluk, V.A., Batluk,V.V., Makarchuk,V.H. A mathematical model of vacuum cleaners, talking into account the motion of particles near the wall of the lust collector // Motrol motoryzacja i energetyka rolnictwa, motorization and power industry in Agriculture 13 D/ 2011. — Lublin. — P. 97—105.
5. Batluk, V.A. Dedaster stepped out of the separator hopper // Patent of invention № 4258a200901592 on 24.02.09. Published 10.12.09. Bull. № 23.

Надійшла 21.01.2013 року

**УДК 621.928.9**

**UDC 621.928.9**

**СНИЖЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛИ  
НА ЭЛЕВАТОРАХ**

**В.А. Батлук, В.М. Климець, Е.Д. Бочкило**

Пылевой взрыв в закрытом пространстве создает избыточное статическое давление, которое в 12,5 раз превышает точку разрушения железобетонной плиты. Наиболее результативным методом избежания опасных ситуаций является разработка методов и способов снижение концентрации пыли, что и было предложено в виде создания высокоэффективных и низкоэнергетических аппаратов для улавливания мелкодисперсных фракций пыли.

*Ключевые слова:* пылеулавливание, жалюзийные отделители, двухступенчатая очистка.

**REDUCTION OF DUST CONCENTRATION  
ON THE ELEVATOR**

**V.A. Batluk, V.V. Klymets, E.D. Bochkalo**

A dust borne explosion in the closed space creates surplus static pressure which in 12,5 times exceeds a breaking of reinforced-concrete flag point. The most effective method of avoidance of near-accidents is development of methods and methods decline of concentration of dust, what was offered as creation of high-efficiency and low-energy vehicles for catching of reduce hazardous emissions factions of dust.

*Key words:* *catching of dust, jalousie separator, two-step cleaning.*