

УДК 621.928.9

*В. А. Батлук, Н. М. Параняк**Національний університет «Львівська політехніка»**Б. О. Білінський**Державний університет безпеки життєдіяльності*

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ В СИСТЕМАХ ПНЕВМАТИЧНИХ МАШИН

Розглядаються питання використання високоефективних апаратів для очищення повітря від пилу з метою доведення шкідливих викидів до санітарно-гігієнічних норм. Описуються нові напрямки створення апаратів пилоочищення, що базуються на дії відцентрово-інерційних сил і завдяки яким вдалося значно підвищити ефективність пилловловлювання.

Очищення повітря, підвищення ефективності, пневматичні машини

Існуючі засоби для вловлювання пилу в системах пневматичних машин недостатньо ефективні й економічні. Для розв'язання цієї проблеми необхідні комплексні наукові дослідження щодо визначення фізико-механічних, електричних і хімічних властивостей пилу, його концентрації й розподілу у виробничій техносфері пневмотранспорту з урахуванням метеорологічних умов навколишнього середовища. Найзначніші позитивні результати у сфері відцентрового вловлювання твердих частинок з газових і рідинних потоків стосуються апаратурного оформлення (конструювання), а не наукових розробок, що пояснюється, з одного боку, накопиченням багаторічного досвіду експлуатації промислових апаратів, а з другого, — складністю опису окремих явищ і характеристик гетерогенних систем: тверде тіло — газ, тверде тіло — рідина у відцентровому полі. Через те теорія роботи циклонів ще не вдосконалена і не дає можливості розраховувати циклони різних конструкцій. Досі питання про найвигідніші форми циклонів вирішується тільки емпіричним шляхом.

Автори розглядатимуть лише варіанти удосконалень у корпусі апарата, при цьому вихідний патрубок чистого повітря — елемент, що найчастіше піддається дослідженню. Це пов'язано з необхідністю подолання вторинного вносу дрібнодисперсного пилу за рахунок радіальних стоків.

Гідравлічний опір апарата для очистки повітря від пилу визначає енергію, що затрачається на процес пилоочищення, і таким чином, його вартість. Геометрична форма і конструкція випускного патрубка очищеного повітря складають основний внесок у загальний гідравлічний опір апарата, який зростає при зменшенні його діаметра та збільшенні глибини входу в апарат. Тому більшість удосконалень випускного патрубка чистого повітря базується на:

зміні його форми (циліндрична, конічна, циліндрично-конічна, спіральна);
оснащенні його зубцями, напрямними спіралями, вібруючими елементами, нахиленими соплами, перфорованими отворами тощо.

Однак усі ці вдосконалення приводять до незначного підвищення ефективності пиловловлювання і зменшення гідравлічного опору через неможливість забезпечення постійної швидкості проходження пилогазового потоку всередині апарата (по всій його висоті зверху вниз), а, відповідно, і тиску в тому ж напрямку.

В основі роботи — завдання створити такий пиловловлювач, в якому певне виконання жалюзійного відокремлювача дозволяє зберегти постійну швидкість руху пилоповітряної суміші в корпусі апарата й при проходженні пилогазового потоку через отвори між жалюзі відокремлювача, що сприяє підвищенню ефективності його роботи та зменшенню гідравлічного опору, а, в свою чергу, і зниженню енергоємності та металомісткості.

Наша мета — досягти значного підвищення ефективності очищення повітря, що подається в пневмосистеми, від дрібнодисперсного пилу при зменшенні гідравлічного опору та габаритів апарата, впровадження коаксіально в середині його корпусу другого ступеня очистки у вигляді жалюзійного віддільника певної принципово нової конструкції.

Для досліджень використовували стандартний експериментальний стенд, розроблений в Національному університеті «Львівська політехніка», і кварцовий пісок; з існуючих пиловловлювачів за еталон вибрали найефективніший циклон ЦН-11 (з ним і порівнюємо параметри новоствореного пиловловлювача).

Для вловлювання дрібнодисперсного пилу пропонується пиловловлювач, схема якого наведена на рис. 1. Пилогазовий потік підводиться в нижній корпус 3 апарата тангенціально через патрубок 1, додатково закручується завихрювачем 2 і рухається гвинтоподібно знизу вверх. Одночасно через патрубок 4 також тангенціально подається допоміжний пилогазовий потік, який закручується додатково завихрювачем 5 і рухається гвинтоподібно зверху вниз. Описаним вище способом у корпусі 3 апарата відбуваються відокремлення частинок аерозолі з пилогазового потоку і виведення їх через пиловипускний патрубок 11. Крім того, допоміжний газ притискає тверді частинки пилу до стінки корпусу 3 і транспортує їх до пиловипускного патрубка 11. У нижній частині корпусу 3 на поворотній шайбі 7 потік допоміжного газу змінює напрям свого руху, попадає в потік запиленого повітря, збільшуючи його обертання. Очищений у корпусі 3 газ подається в патрубок 6, до якого приєднаний (у верхній його частині) жалюзійний віддільник 8 з жалюзі 9. Жалюзі 9 виконані випуклими з радіусом кривизни, спрямованим всередину жалюзійного віддільника 8, і розташовані з мінімальним кутом атаки (кутом між напрямком руху газового потоку в патрубку 6 і площиною кожної жалюзі). Наблизившись до віддільника 8, газовий потік з дрібнодисперсними частинками повертає в щілини 10 між жалюзі 9 і проходить назовні відокремлювача у верхній корпус апарата 12. Дрібнодисперсні частинки через свою інертність не встигають за потоком, співударяються з жалюзі 9, відскакують і, сповзаючи вниз, збираються в малому бункері віддільника 14, а очищене повітря викидається назовні через патрубок виходу 13. Стінка бункера 14 ділить патрубок 6 виходу очищеного повітря з корпусу 3 на дві частини таким чином, що очищений в нижньому кор-

пусі 3 пилогазовий потік виходить з корпусу 3 вздовж смкості, створеної циліндрами із зовнішнім діаметром D і внутрішнім D_1 . Отже, в апараті основний і допоміжний пилогазові потоки подаються в корпус 3 апарата тангенціально через патрубки 1 і 4, закручуються завихрювачами 2 і 5 назустріч один одному, підсилюючи тим самим ефект дії відцентрових сил і сил тяжіння.

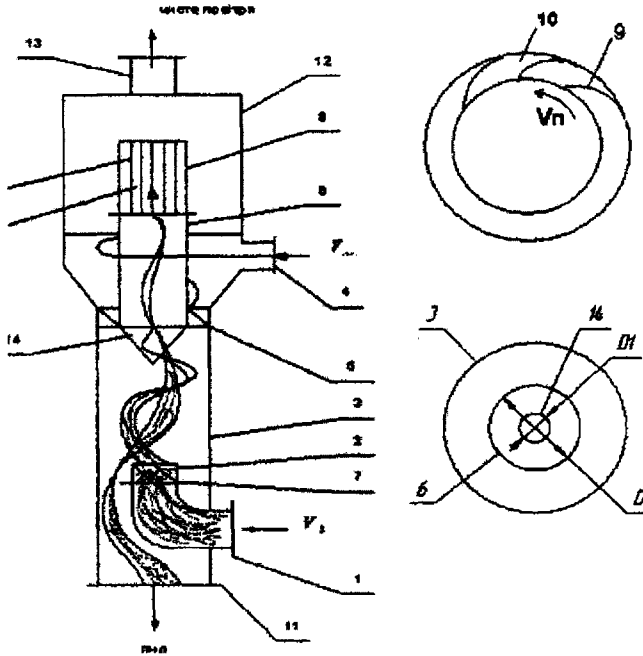


Рис. 1. Схема вихрового пиловловлювача

У запропонованій конструкції розташування жалюзійного відокремлювача поза корпусом апарату 3 і конструювання його як продовження вихідного патрубку очищеного повітря 6 з корпусу 3 дозволяє уникнути турбулізації потоку і виділити його окремим елементом — другим ступенем очистки. Таким чином, газовий потік, який пройшов очистку в корпусі 3 вихрового пиловловлювача, виводиться з нього через патрубок 6 і попадає в другий ступінь очищення в додатковому корпусі 12, під дією інерційних сил у жалюзійному віддільнику 8. Виділений пил лишається всередині віддільника 8 і випадає в бункер 14, а очищене повітря проходить через щілини 10 між жалюзі 9 віддільника і попадає у верхній додатковий корпус 12, звідки виводиться назовні через патрубок виходу очищеного повітря 13. Отже, залишаючи незмінним вихровий пиловловлювач, проводимо додаткову очистку того газу, який у звичайному стані викидається вже назовні, і тим самим підвищуємо ефективність очищення повітря від дрібнодисперсного пилу.

В існуючих конструкціях вихрових пиловловлювачів очищене повітря, яке виходить через випускний патрубок 6, викидається з корпусу 3 назовні. У запропонованій же конструкції відбувається додаткове очищення цього повітря

від дрібнодисперсних частинок пилу в додатковому корпусі 12 апарата, який містить у собі другий ступінь очистки — жалюзійний віддільник.

Оснащення пиловловлювача додатковим корпусом 12, розміщеним у верхній частині апарата над патрубком вводу допоміжного газу 4, який є продовженням основного корпусу 3, де коаксіально розташований жалюзійний віддільник, дозволяє очистити повітря, уже очищене від крупнодисперсного пилу в нижньому корпусі 3, і від дрібнодисперсних частинок, яких це повітря викидало назовні в попередніх конструкціях. Тобто повітря додатково очищується в другому ступені — жалюзійному віддільнику 8, а це значно підвищує ефективність пиловловлювання.

Принципово виконання жалюзі віддільника, запропоноване нами, дозволяє створити мінімальний кут атаки — кут між траєкторією руху пилогозового потоку і площиною кожної жалюзі, що створює найсприятливіші умови для обтікання їх потоком і виходу очищеного повітря через додатковий корпус і патрубок назовні. Тверді частинки дрібнодисперсного пилу, які несе з собою цей потік, мають найсприятливіші умови для сепарації з нього за рахунок відбиття від жалюзі, тобто зростає ймовірність їх стикання з жалюзі і відбиття в його середину, що, в свою чергу, підвищує ефективність роботи.

Статистична обробка експериментальних даних проводилася у відповідності із загальноприйнятою методикою. Визначили умови, за яких можна досягти підвищення ефективності вловлювання пилу, та вплив основних факторів на цей процес.

Математична модель роботи запропонованого апарата найкраще описується рівнянням 3-го порядку з урахуванням сумісних ефектів:

$$\begin{aligned} \% \text{ вловлювання пилу} = & -0,0874 \cdot x_1 + 2,2168 \cdot x_2 - 0,6249 \cdot x_3 + 0,5445 \cdot x_1 x_2 \\ & - 1,8450 \cdot x_1 x_3 - 2,2258 \cdot x_2 x_3 + 1,3699 \cdot x_1 x_2 x_3 + 0,0372 \cdot x_1^2 - 0,2646 \cdot x_2^2 + 0,5722 \cdot \\ & x_3^2 + 0,0405 \cdot x_1^3 + 0,4095 \cdot x_2^3 + 0,8243 \cdot x_3^3, \end{aligned}$$

де x_1 — затрати повітря; x_2 — розмір пилу; x_3 — маса частинки пилу.

Усі параметри пилу обраховані в стандартизованому вигляді (у безрозмірних одиницях), щоб запобігти впливу величин розмірностей і мати можливість оцінити «вагу» кожного фактора.

Як бачимо з розгляду й оцінок коефіцієнтів при членах даної моделі, найбільший вплив на ступінь вловлювання пилу справляють фактор розміру пилу та сумісні з ним ефекти (коефіцієнти при членах $\cdot x_2$ та $\cdot x_2 x_3$ дорівнюють, відповідно, 2,217 та 2,226).

Оцінка сум коефіцієнтів при лінійних, квадратичних і кубічних членах ($a_1 + a_1^2 + a_1^3$) також найвища для фактора розміру пилу. Ця величина складає 2,362 для ($a_2 + a_2^2 + a_2^3$) і четверо перевищує аналогічну для фактора маси частинок пилу ($a_3 + a_3^2 + a_3^3 = 0,772$). Таким чином, чим більший розмір фракцій пилу, тим краще він буде вловлюватися.

При оцінці сумісних ефектів впливу очевидно, що, як і раніше, фактор розміру пилу найвагоміший серед інших. Для нього величина $(a_2 + a_2^2 + a_2^3 + \sum a_2 a_x)$ складає 2,050. Навпаки, вплив маси частинки пилу з урахуванням сумісних ефектів взаємодії всіх факторів $(a_3 + a_3^2 + a_3^3 + \sum a_3 a_x)$ дорівнює -1,929. Отже, і в даному випадку «вага» цього показника нижча, ніж для розміру пилу. Негативний знак для даної суми свідчить, що збільшення ступеня пиловловлювання відбуватиметься із зменшенням маси пилу. Це можна пояснити тим, що тут враховано сумісний ефект маси пилу і витрат повітря. Цей ефект значно погіршує процес пиловловлювання (коефіцієнт при $x_1 x_3 = -1,845$). Зрозуміло, що чим більша маса частинки, тим слабше на неї впливає швидкість руху повітря, тобто його витрата.

Загальний аналіз усіх коефіцієнтів при всіх членах наведеної статистичної моделі процесу пиловловлювання показує, що за їхньою «вагою» всі досліджувані фактори можна розмістити в порядку збільшення їх впливу наступним чином:

$$M_1=0,0597; M_2=-1,9293; M_3=2,0503.$$

Витрати повітря < маса частинки пилу < розмір пилу.

Перевірка результатів теоретичних досліджень і визначення межі оптимальних значень параметрів робочого процесу й ефективної роботи апарата виконана відповідно до поставленої мети та завдань досліджень.

Головним показником найбільшого ефекту роботи апарата є ефективність пиловловлювання (Y). Фактори впливу на цей показник такі:

x_1 (α) — кут повороту напрямку руху при проходженні пилоповітряної суміші крізь жалюзі, град.;

x_2 (V) — швидкість руху пилоповітряної суміші у вхідному патрубку, м/с;

x_3 (δ) — розмір пилу, мкм;

x_4 (H/d) — співвідношення висоти патрубка виходу чистого повітря H до діаметра пилівипускного патрубка d ;

x_5 (β) — кут нахилу пилівипускного патрубка до горизонтальної осі, град.;

x_6 (γ) — концентрація пилу, г/м³.

Ефективність пиловловлювання як функції від шести незалежних факторів $Y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ визначали з використанням D — оптимального плану із зірковими точками. Варіювання факторами передбачалося на трьох основних рівнях (верхній +1, нижній -1, нульовий 0) і двох додаткових (+*, -*). Діапазони варіювання змінними встановлено на підставі раніше проведених експериментів.

Опис поверхні відгуку в локальній області отримано в результаті реалізації 1/2 репліки повного факторного експерименту типу 26-1 при генеруючому співвідношенні $x_6 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5$.

Для знаходження зіркового плеча визначали значення φ :

$$\varphi = \sqrt{\frac{2k}{n}} = \sqrt{\frac{2^{6-1}}{45}} = \sqrt{\frac{32}{45}} = 0,8432,$$

де k — число чинників; n — кількість дослідів.

Зіркове плече

$$d = \sqrt{\frac{m_0 - \bar{x}^2}{2}} = \sqrt{\frac{45 \cdot 0,8432 - 2^{6-1}}{2}} = 1,724.$$

У результаті математичної обробки експериментальних даних отримано адекватне рівняння регресії залежності ефективності пиловловлювання від вищеперахованих факторів. Для виключення систематичних помилок проводили рандомізацію дослідів по **зигчику** випадкових чисел. Кожний експеримент використовували тричі, а загальну дисперсію відтворності визначали як середнє значення дисперсій по **окремим** дослідом. Однорідність дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена, що дозволило зробити висновок про повноту факторів.

Унаслідок математичної обробки експериментальних даних отримали адекватне рівняння регресії залежності ефективності пиловловлювання від вищенаведених факторів:

$$Y_1 = 95,4875 + 1,228641 x_1 + 0,752997 x_2 + 3,927857 x_3 - 1,70012 x_4 + 0,084334 x_5 + 2,775538 x_6 - 1,11558 x_1^2 - 0,0625 x_1 x_2 + 0,0625 x_1 x_4 - 0,00625 x_1 x_5 + 0,0375 x_1 x_6 - 0,94736 x_2^2 - 0,01875 x_2 x_3 - 0,01875 x_2 x_4 + 0,0375 x_2 x_5 - 0,00625 x_2 x_6 - 2,29317 x_3^2 + 0,04375 x_3 x_4 - 0,025 x_3 x_5 + 0,05625 x_3 x_6 - 2,04083 x_4^2 - 0,025 x_4 x_5 + 0,05625 x_4 x_6 - 1,78849 x_5^2 - 0,94736 x_6^2.$$

Адекватність опису поверхонь відбивання поліномом 2-го ступеня перевіряли за F -критерієм (Фішера).

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{воспр}^2} = \frac{0,202}{0,164} = 1,232 < F_{табл} \approx 1,7.$$

Фактори $x_1 - x_6$ наведено в кодових значеннях. Для переходу від кодових до фактичних значень використовували наступну залежність:

$$\alpha = 25x_1 + 135; V = 3x_2 + 20; \delta = 17x_3 - 30; H/d = 0,7x_4 + 2,5; \beta = 6x_5 + 45; \gamma = 1,5x_6 + 3.$$

З аналізу рівнянь виявлено залежність ефективності пиловловлювання від окремо взятих факторів. Графіки залежності наведено на рис. 2.

Виконання патрубка виходу очищеного повітря з першого корпусу 6 у вигляді двох циліндрів з певним співвідношенням діаметрів дозволяє запобігти змішуванню дрібнодисперсних частинок, виділених з потоку, із пилоповітряним потоком, який виходить з корпусу 3, що також обумовлює підвищення ефективності роботи апарата.

При зниженні швидкостей руху потоку в корпусі апарата — при проходженні через отвори між жалюзі, згідно із законом Бернуллі, підвищується статичний тиск навколо віддільника. При вищенаведених оптимальних умовах роботи апарата значно зменшується підсмоктування газу в місці стику корпусу з бункером, а по центру пиловловлювача з його бункера рухається вторинний гвинтоподібний вихор знизу вгору зі значно меншими радіусом і швидкістю. Це виключає або зменшує кількість захопленого ним пилу, що, в свою чергу, приводить до підвищення ефективності пиловловлювання.

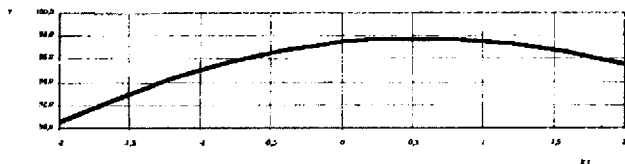


Рис. 2. Залежність ефективності пиловловлювання від кута повороту напрямку руху при проходженні пилоповітряної суміші крізь жалюзі

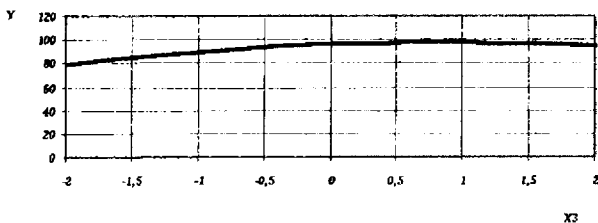


Рис. 4. Залежність ефективності пиловловлювання від розміру пилу

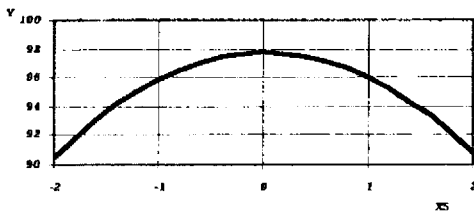


Рис. 6. Залежність ефективності пиловловлювання від кута нахилу пиловипускного патрубку

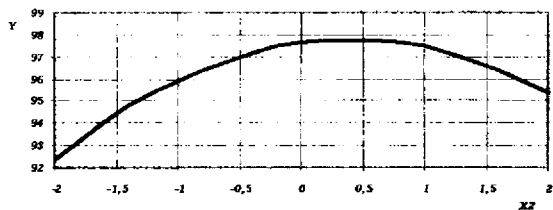


Рис. 3. Залежність ефективності пилоловлювання від швидкості руху пилоповітряної суміші

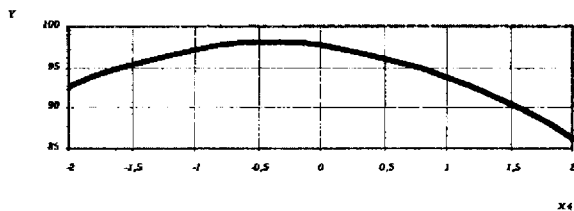


Рис. 5. Залежність ефективності пилоловлювання від співвідношення H/d

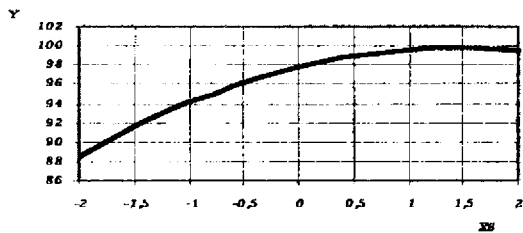


Рис. 7. Залежність ефективності пилоловлювання від концентрації пилу

На експериментальному стадії «Львівської політехніки» проведено порівняльні дослідження ~~зирвового~~ пиловловлювача з циклоном ЦН-11, які засвідчили його переваги. Завдяки вдалося підвищити ефективність пиловловлювання на 2–4% ~~за рахунок жалюзійного віддільника~~ в окремому корпусі, розташованого над ~~патрубком входу~~ вторинного газового потоку; при цьому гідравлічний опір його ~~зменшився на 80–100 Па~~, а габаритні розміри — в 1,2 раза.

Таким чином, у ~~рекомендованій~~ інструкції маємо вирівнювання потоків усередині корпусу апарата, ~~зменшення~~ потоку, зменшення швидкості турбулентних вихорів, радіуса ~~вторинного вихора~~, який рухається гвинтоподібно знизу доверху назустріч руху ~~пилуговальної суміші~~, що переміщається зверху донизу, і виключення підсмоктування газу в місці стиску корпусів, а це значно підвищує ефективність роботи апарата і ~~зменшує~~ його гідравлічний опір.

Таким чином, нам вдалося ~~створити~~ пиловловлювач, який, крім вищезгаданих переваг, дає змогу ~~знизити~~ концентрацію пилу в системах повітропостачання пневматичних машин ~~до гранично-допустимих норм~~, зменшити енергоємність і металомісткість, що ~~відкриває~~ широкі перспективи для його впровадження.

У даний час розробляються ~~креслярські~~ дослідно-промислового зразка апарата для впровадження його в системах повітропостачання пневматичних машин.

1. Високоєфективний пиловловлювач / Батлук В. А. Декларац. пат. № 62071А Україна; опубл. 15.12.03, Бюл. 12. 2. Вихровий ~~пыловловитель~~ / Батлук В. А., Шелюх Ю. Є. Декларац. пат. № 53864А Україна; опубл. 17.12.03, Бюл. 21. 3. Гордон Г. М. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей / под ред. Г. М. Гордона, Г. М. Зайцева, П. А. Коузова. — Л., 1967.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА В СИСТЕМАХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН

Рассматриваются вопросы использования высокоэффективных аппаратов для очистки воздуха от пыли с целью доведения вредных выбросов до санитарно-гигиенических норм. Описываются новые направления создания аппаратов пылеочистки, базирующихся на действии центробежно-инерционных сил, благодаря которым удалось значительно повысить эффективность пылеулавливания.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF AIR PURIFICATION SYSTEMS PNEUMATIC MACHINES

The clause for considers the question of air dust collecting in different production brands by the highli effective apparatus for the polution decreasing to the sanitary-hygienic norms. The effience of dust collecting effectivety increasing methods is confirmed theoriticaly and practically. The main results of this work are used in highli effective dust collecting schemes for differentbrands of production.

Стаття надійшла 19.11.09