

УДК 621.928.9

В. А. Батлук, Р. М. Василів, В. В. Батлук

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

**ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ПРИНЦИПОВО
НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ АПАРАТА ЗА ДОПОМОГОЮ
КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Описується фізична суть явищ, які відбуваються в пилоловлювачах, і визначається характер розподілу тиску та швидкостей у них; аналізуються сили, котрі діють на частинки аерозолію і характер їх руху, що дозволяє розкрити фізичну суть руху повітряного потоку в проєктованому апараті, значно скоротити кількість експериментальних досліджень з вивчення впливу параметрів апарата на ефективність його роботи.

Темпи підвищення ефективності роботи комплектуючих апаратів схем пилоочищення помітно відстають від вимог до них з точки зору енергоємності і металомісткості. Виникло протиріччя: з одного боку, значно зросли потенційні можливості установок для очистки повітря від пилу і вимоги до них, а з другого, — посилилися проблеми стосовно реалізації даних можливостей через ускладнення схем пилоочищення. Це спричинило потребу в забезпеченні підвищених вимог щодо ефективності роботи апаратів пилоочищення, що залежить від їхньої спроможності зберігати роботоздатність упродовж визначеного часу за певних умов експлуатації.

Розв'язання протиріччя, що виникло, шляхом проєктування схем пилоочищення на апаратах, які характеризуються високою ефективністю, малим гідравлічним опором і габаритами, становить актуальну проблему сучасності — очищення повітря від пилу.

Є два принципово різних шляхи боротьби із забрудненнями: очищення шкідливих викидів промисловості і сільськогосподарських підприємств; розроблення безвідходних технологічних процесів, які максимально імітують природні замкнуті процеси — найбільш радикальний та економічний. Уся сировина, що надходить у виробництво, переробляється на корисні продукти або передається на сусіднє виробництво. Дотепер основні зусилля спрямовувалися на розширення мережі очисних споруд. Це було неминучим, тому що вся промисловість ще донедавна розвивалася без урахування можливостей безвідходної технології. Забруднення біосфери начебто планувалося, тобто проєктувався завод, який повинен був давати розраховану кількість відходів, що викидаються, і паралельно мали будувати очисні споруди відповідної потужності. Будівництво очисних споруд одержало в нас широке розповсюдження, і воно триватиме доти, доки всі наявні

виробництва не забезпечать очищення своїх викидів або їхня технологія не стане безвідходною.

Щоб мати можливість вживати будь які конкретні заходи щодо усунення тих або інших джерел забруднення біосфери, потрібно насамперед виявити їх та встановити зв'язок між забрудненням і його наслідками. Значимість проблеми зумовлена відсутністю завершеної наукової теорії процесу пилоочищення, яка відповідала б вимогам очищення повітря від пилу.

Для дослідження аеродинамічних процесів, що відбуваються у пиловловлювачі з жалюзіями складної конструкції та трубою Вентурі, подальші експерименти проводилися в двох напрямках, які полягали у вивченні: перший — аеродинаміки створеного апарата за допомогою комп'ютерного моделювання, другий — характеристик пиловловлювача на стандартному експериментальному стенді. При виготовленні моделі пиловловлювача для проведення досліджень було взято конструкції, розроблені автором і захищені патентами України на винахід.

Вплив окремих елементів на характеристики сепаратора вивчали на твердотільних апаратах трьох моделей. Перша модель (рис. 1а) — циклон з жалюзійним відокремлювачем, друга (рис. 1б) — створена на основі першої монтуванням труби Вентурі перед входним патрубком. У третій моделі (рис. 1в) трубу Вентурі з'єднано патрубком з жалюзійним відокремлювачем. У процесі дослідження моделювалась робота сепараторів при різних швидкостях потоку повітря у входному патрубку і з жалюзі різної конструкції. Метою моделювання було дослідження розподілу статичного тиску та складових швидкості потоку повітря в наведених конструкціях пиловловлювачів, їх гідравлічного опору й ефективності.

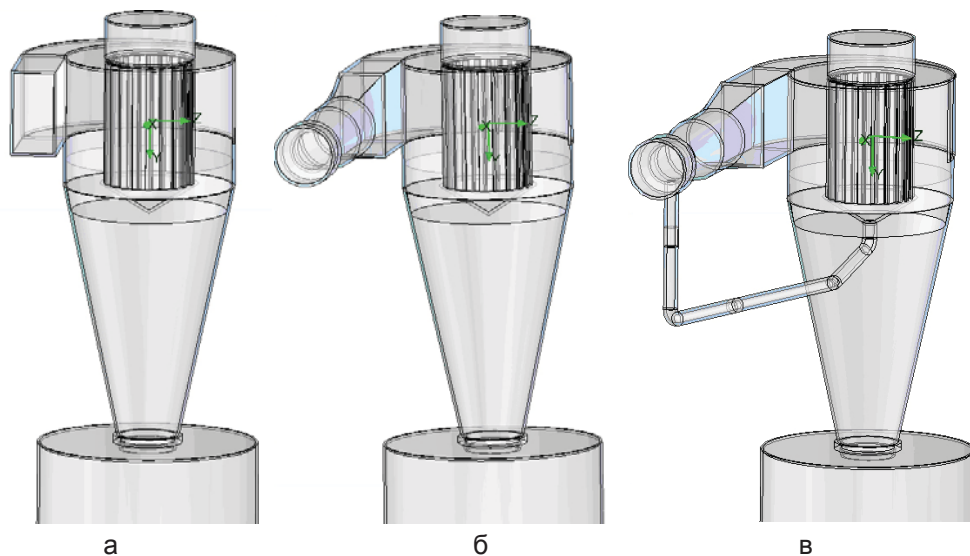


Рис. 1. Тривимірні моделі пиловловлювачів:
а — модель А; б — модель Б; в — модель В

Аналіз аеродинамічних процесів в апараті проводили, виходячи з рівнянь Нав'є-Стокса, які описують у нестационарній постановці закони збереження маси, імпульсу й енергії середовища, рівняння стану компонентів потоку, емпіричні залежності в'язкості і теплопровідності даних компонентів середовища від температури. Цими рівняннями моделювали турбулентні, ламінарні і перехідні потоки. Для моделювання турбулентних потоків (вони найчастіше зустрічаються в сепараційній зоні циклона) згадані рівняння Нав'є-Стокса усереднювали за критерієм Рейнольдса, тобто використовували усереднений в малому масштабі часу вплив турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні тимчасові зміни усереднених за малим масштабом і часом складових газодинамічних параметрів потоку (тиску, швидкостей, температури) враховували введенням відповідних похідних за часом. У результаті рівняння мали додаткові члени — напруження за критерієм Рейнольдса.

Для замикання цієї системи рівнянь використовували рівняння перенесення кінетичної енергії турбулентності та її дисипації в рамках *k-ε* моделі турбулентності. Ця система рівнянь збереження маси, імпульсу й енергії нестационарної просторової течії має наступний вигляд у рамках підходу Ейлера в декартовій системі координат ($x_i, i=1,2,3$), яка обертається з кутовою швидкістю Ω навколо осі, що проходить через її початок:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\tau_{ik}}{\partial x_i} = S_i; \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (3)$$

де t — час; u — швидкість потоку повітря, м/с; ρ — густина потоку повітря, кг/м³; P — тиск повітряного потоку, Па; S_i — зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу повітряного потоку (Н); E — повна енергія одиничної маси потоку; Q_H — тепло, що виділяється тепловим джерелом в одиничному об'ємі потоку; τ_{ik} — тензор в'язких зсувних напружень; q_i — дифузійний тепловий потік (нижні індекси означають підсумовування за трьома координатними напрямками).

$$S_i = S_{iporous} + S_{igravity} + S_{irotation}, \quad (4)$$

де $S_{iporous}$ — дія опору пористого тіла; $S_{igravity}$ — дія гравітації; $S_{irotation}$ — дія обертання системи координат.

Для проведення числового аналізу та візуалізації результатів обчислень застосовували студентську версію пакета Cosmos Floworks. Тривимірна модель створювалася в студентській версії пакета Solidworks.

Початковими умовами для апаратів даних типів є характеристики повітряного середовища і пилу:

атмосферний тиск за нормальних умов $P_0=101325$ Па;
 температура середовища за нормальних умов $T_0=293$ К;
 густина повітря $\rho_n=1,293$ кг/м³;
 густина матеріалу частинок пилу $\rho_u=720$ кг/м³.

Основні геометричні розміри пиловловлювача наступні (рис. 2): $R_1=0,7$; $H=0,7$; $r_1=0,4$; $r_2=0,3$, де R_1 — радіус циліндричної частини апарата, м; H — висота циліндричної частини апарата, м; r_1 та r_2 — відповідно, внутрішній і зовнішній радіуси жалюзійного відокремлювача, м.

Граничні умови для даної конструкції апарата були такими:
 швидкість потоку повітря v у вхідному патрубку труби Вентурі 18 м/с.
 вільний вихід повітряного потоку з вихлопної труби сепаратора.

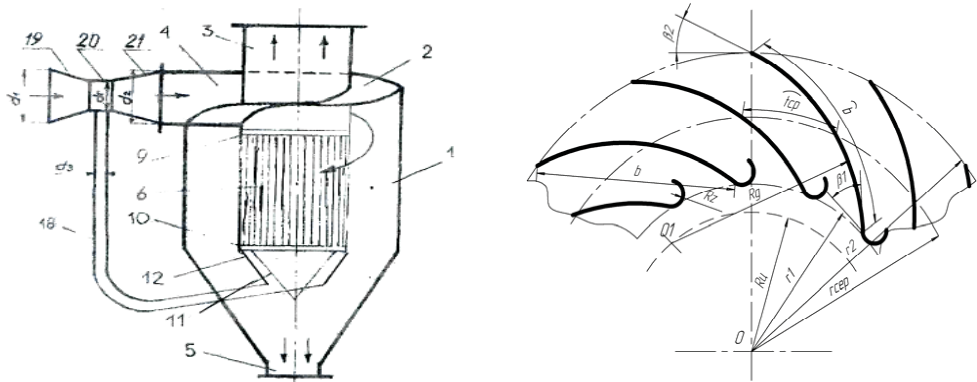


Рис. 2. Схема жалюзійного відокремлювача

Метою проведення розрахунків було визначення повного, статичного та динамічного тисків на вході і виході пиловловлювача, вивчення розподілу швидкостей потоку повітря в пиловловлювачі та дослідження його гідравлічного опору. У результаті довели, що найвищою є швидкість потоку повітря в циліндричній частині циклона. При просуванні його вздовж осі апарата швидкість руху зменшується внаслідок відведення частини повітря через жалюзійний відокремлювач в атмосферу. Найнижчі швидкості потоку зафіксовано на осі циклона і в бункері. Розміщення жалюзійного відокремлювача на осі циклона зумовлює розподіл радіального стоку по всій його площі, про що свідчить рівномірний розподіл швидкостей потоку в жалюзійному відокремлювачі.

Поблизу вихлопної труби швидкість потоку повітря значно нижча, ніж у сепараційній зоні, що призводить до того, що на частинки пилу, які потрапляють в циклон поблизу вихлопної труби, буде діяти менша відцентрова сила, ніж на ті частинки, місце входу яких знаходиться на більшій відстані від неї. Перепад значення швидкості потоку близько 14 м/с у сепараційній зоні спричиняє

виникнення вихорових потоків і, як наслідок, збільшення гідравлічного опору. В апараті з жалюзійним відокремлювачем такого перепаду немає, що підтверджує його переваги. Використання жалюзі складної конструкції дає змогу розширити область з високими швидкостями руху повітряних потоків у сепараційній зоні циклона. Слід відмітити, що поблизу вгнутого боку жалюзі спостерігаються низькі зони швидкостей $\approx 3-5$ м/с, що може призвести до забивання їх пилом. Тому при проектуванні жалюзійного відокремлювача не слід вибирати надто малі радіуси. У моделі з жалюзійним відокремлювачем складної конструкції в сепараційній зоні циклона зафіксовано значно вищі значення швидкості потоку повітря.

Захоплювальна дія криволінійного потоку повітря на частинку пилу в циклоні здійснюється силою в'язкого опору середовища, відносному рухові, і силою гідродинамічного тиску. У циклоні, як і в будь-якому криволінійному потоці, статичний тиск повітря значно зменшується в напрямку від периферії до центра обертання потоку, тому ефективність очищення газів знижується через підвищене розрідження і перепад тисків уздовж осі циклона. Зі збільшенням градієнта тиску знижується й ефективність циклона, підсилюються вторинні потоки та зростає його гідравлічний опір. Тому важливо дослідити, як змінюватиметься статичний тиск у плоскому поперечному перерізі розроблених моделей пиловловлювачів. На підставі досліджень розподілу швидкостей потоку та статичного тиску робимо висновок, що у моделі В створюються сприятливіші умови для сепарації частинок пилу з повітряного потоку.

Тангенціальна складова швидкості потоку повітря (V_t) має значний вплив на процес сепарації пилу в циклоні, оскільки визначає відцентрову силу, що діє на частинку пилу, і тому її аналіз має важливе значення при вивченні нових типів сепараторів. При швидкості потоку у вхідному патрубку 18 м/с у сепараційній зоні апарата з жалюзійним відокремлювачем тангенціальна складова швидкості потоку повітря дорівнює майже 20–26 м/с. Більш рівномірний характер зміни тангенціальної і вертикальної складових потоку повітря в апараті моделі В повинні забезпечити його вищу ефективність порівняно з традиційною конструкцією пиловловлювача.

Аналіз траєкторій руху повітряних потоків у циклоні з жалюзійним відокремлювачем показав, що радіальний стік у корпусі нижче жалюзійного відокремлювача практично відсутній. Позитивним фактором також є те, що швидкість повітряного потоку у вихлопній трубі значно нижча, ніж у сепараційній зоні. Одержані результати дають змогу чіткіше описати рух повітряних потоків у запропонованій конструкції апарата.

Відповідно до руху в сепараційній зоні частина повітряного потоку через жалюзійний відокремлювач потрапляє в атмосферу, тому швидкість повітря у внутрішньому потоці становить майже 3–4 м/с, у той час як у циклоні з традиційною вихлопною трубою вона вища — 10–12 м/с. Зниження швидкості внутрішнього вихору є фактором, що позитивно впливає на ефективність роботи апарата. Наведені результати дають змогу розглядати циліндричну частину циклона як основний сепараційний простір пиловловлювача.

При дослідженнях траєкторій руху частинок пилу в сепараторі виходили з наступних міркувань. Двофазові потоки з рідкими або твердими частинками моделювалися як рух цих частинок у сталому (розглядаються тільки стаціонарні двофазні течії) потоці текучого середовища. Це припущення правильне в тому випадку, коли масова частка частинок у двофазовому потоці не перевищує 30%, що повністю задовольняє умови, які виникають у деревообробці. При визначенні коефіцієнта опору частинок передбачається, що вони (як рідкі, так і тверді) мають сферичну форму. Розраховується коефіцієнт опору частинок за формулою Хендерсона для нерозріджених і розріджених, до-, транс- і надзвукових, ламінарних, перехідних і турбулентних умов обтікання частинок. Температура частинки обчислюється за формулою теплообміну її з навколишнім текучим середовищем. Враховувався вплив температури частинки на щільність її матеріалу.

Маса частинки вважається незмінною, а розмір — змінним. Взаємодія частинок з поверхнями твердих тіл моделюється як повне прилипання частинок до поверхні (притаманне краплям рідини за не дуже високих швидкостей співударяння) або як ідеальне чи неідеальне відбивання (властиве твердим частинкам). Якщо складову швидкості частинки за нормалю до поверхні безпосередньо перед її зіткненням з цією поверхнею позначити V_{1n} , складову швидкості частки по дотичній до цієї поверхні також перед її зіткненням з цією поверхнею як $V_{1\tau}$, а ці ж складові швидкості частинки відразу після її зіткнення зі стінкою — відповідно, V_{2n} і $V_{2\tau}$ та розглянути відношення $e_n = \left| \frac{V_{2n}}{V_{1n}} \right|$; $e_\tau = \frac{V_{2\tau}}{V_{1\tau}}$, то при ідеальному відбиванні $e_n = e_\tau = 1$, а при неідеальному — $e_n < 1$ й $e_\tau < 1$.

Виходячи з континуальної моделі двофазної течії, тобто течії взаємопроникаючих континуумів газової фази і частинок різних фракцій (усі частинки діляться на фракції за певною ознакою, що дозволяє однозначно задавати початкові умови руху частинок у перетині, для якого цей рух розраховується: наприклад, якщо в деякій точці початкового перетину можуть перебувати частинки різних розмірів, то таким параметром є розмір частинок), при попаданні частинок на стінку визначається сумарна інтенсивність налипання частинок на ці поверхні по всіх поверхнях, на які випали частинки, за формулою

$$R_{\sum \text{accretion}} = \sum_{i=1}^N M_{pi},$$

де N — число фракцій частинок; M_{pi} — витрата частинок i -ї фракції, що випали на ці поверхні.

Інтенсивність виносу матеріалу стінок, на які випали частинки (рішення про те, чи призведе випадання частинок на ці поверхні до їх налипання на них або до виносу матеріалу з них залишається за користувачем) і визначається за формулою

$$R_{\sum \text{accretion}} = \sum_{l=1}^N JK_l \cdot V_{pl}^b \cdot f_{li}(\alpha_{pl}) \cdot f_{2l}(d_{pl}) dm_{pl},$$

де K_i — заданий користувачем коефіцієнт ерозії матеріалу поверхні; V — швидкість частинок безпосередньо перед зіткненням, м/с; J — заданий користувачем показник ступеня; $f_{ii}(\alpha_{pi})$ — безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив на ерозію кута α наближення частинок до поверхні випадання (щодо нормалі поверхні); $f_{2i}(d_{pi})$ — безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив на ерозію діаметра d частинок.

У результаті моделювання траєкторій руху частинок пилу діаметром $5 \cdot 10^{-5}$ м видно, що більшість цих частинок доходить до зовнішньої стінки циклона, але при цьому певна частина з них досягає жалюзійного відокремлювача, наявність якого перешкоджає потраплянню їх до патрубку виходу очищеного повітря, і тоді вони рухаються вздовж нього за спіральними траєкторіями і, дійшовши до його дна, вловлюються.

При дослідженні залежності гідравлічного опору пиловловлювача від швидкості потоку повітря у вхідному патрубку встановлено, що зі збільшенням швидкості потоку повітря у вхідному патрубку зростає гідравлічний опір циклона, і при цьому залежність має квадратичний характер. Після зростання швидкості потоку понад 20 м/с різко збільшується гідравлічний опір циклона, тому використання пиловловлювачів за таких режимів роботи є недоцільним.

Використання жалюзі складної конструкції доцільне з точки зору зменшення гідравлічного опору пиловловлювача. Так, влаштування завитки на кінці жалюзі радіусом $R_z = 10$ мм (рис. 2) дає змогу знизити гідравлічний опір моделі В з 930 до 706 Па при швидкості потоку повітря у вхідному патрубку 18 м/с. Такі результати можна пояснити випрямленням повітряного потоку у вихлопній трубі, а в результаті зменшенням турбулентних пульсацій.

Таким чином, дослідження процесів, які відбуваються у відцентрово-інерційних пиловловлювачах, дозволили створити їх математичну модель, що лягла в основу конструювання апаратів принципово нового типу, з підвищеною ефективністю роботи та зменшеними енергоємністю і металомісткістю. Усе це дає можливість довести концентрацію пилу при проведенні цілого ряду технологічних процесів до гранично-допустимих норм, зменшивши тим самим його пожежо- і вибухонебезпечність.

У даний час запропоновані конструкції пиловловлювачів впроваджуються в деревообробній промисловості.

1. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй / Абрамович Г. Н. — Г.: Физматгиз, 1960.
2. Ландау Л. Д. Механіка суцільних середовищ / Л. Д. Ландау, Е. М. Ліфшиц — М.: ГИТТЛ, 1954.
3. Харлоу Ф. Х. Чисельний метод частинок у комірках для задач гідродинаміки. Обчислювальні методи в гідродинаміці / Харлоу Ф. Х. — М.: Мир, 1967.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ ПРИНЦИПИАЛЬНО НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ АППАРАТА ПОСРЕДСТВОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Описывается физическая сущность явлений, протекающих в пылеуловителях, и определяется характер распределения давлений и скоростей в них; анализируются силы, которые действуют на частички аэрозоля и характер их движения, что позволяет

раскрыть физическую сущность движения воздушного потока в проектируемом аппарате, значительно сократить количество экспериментальных исследований по изучению влияния параметров аппарата на эффективность его работы.

RESEARCH OF AERODYNAMICS OF PRINCIPLE A NEW CONSTRUCTION OF APARATA BY MEANS COMPUTER DESIGN

Physical essence of the phenomena is described, protekayushih in pileulovitelyah, and the character of distributing of pressures and speeds in them is determined; forces which operate on the particles of aerosol are analysed, on the character of their motion, that allows to expose physical essence of motion of current of air in the designed vehicle, it is considerably to shorten the amount of experimental researches on the study of influencing of parameters of vehicle on efficiency of his work.

Стаття надійшла 18. 10.08

УДК 621.928.9

В. А. Батлук, І. В. Проскуріна, Р. Ю. Сукач, М. В. Басов

Національний університет «Львівська політехніка»

ПРИНЦИПОВО НОВІ ПЕРСПЕКТИВНІ МЕТОДИ ОЧИСТКИ ПОВІТРЯ ВІД ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ

Розглядаються питання забезпечення високоефективними апаратами очищення повітря від дрібнодисперсного пилу для доведення шкідливих викидів до санітарно-гігієнічних норм. Наводяться нові напрями створення апаратів пилоочищення, що базуються на дії відцентрово-інерційних сил і значно підвищують ефективність пилоуловлювання.

Вплив людини на природу, навколишнє середовище не завжди негативний. Як змінюється якість навколишнього середовища — поліпшується чи погіршується — визначається тим, наскільки раціонально організований процес природокористування. Ми не можемо не підпорядковуватися екологічним законам і повинні знайти можливості вписатися зі своїм виробництвом у комплекс екосистем природи, інакше руйнування їх є неминучим. Є два принципово різних шляхи боротьби із забрудненнями: очищення шкідливих викидів промисловості і сільськогосподарських підприємств; розроблення безвідходних технологічних процесів, які найповніше імітують замкнені природні процеси (найбільш радикальний і економічний).

Дотепер основні зусилля були спрямовані на розширення мережі очисних споруд. Це було неминучим, тому що вся промисловість до 60-х років розвивалася без обліку можливості безвідходної технології. Забруднення біосфери начебто планувалося, тобто проектувався завод, який мав давати розраховану кількість відходів, що викидаються, і паралельно намічалася будівництво очисних споруд відповідної потужності. Будівництво очисних