

DOI: 10.32347/2786-7269.2025.11.456-463

УДК 622.807

Микитенко М.Р.,

mykytenko_mr@knuba.edu.ua, ORCID:0000-0003-2891-6136,
Київський національний університет будівництва і архітектури

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ РУХУ ЧАСТИНОК У ЦИКЛОННИХ РОЗПИЛЮВАЛЬНИХ АПАРАТАХ

Представлено дослідження руху частинок у циклонних розпилювальних апаратах з урахуванням впливу основних сил, таких як відцентрова сила інерції, аеродинамічний опір та турбулентний масоперенос. Розглянуто механізм осадження частинок на стінках апарата, а також взаємодію частинок із газовим потоком. Запропоновано математичну модель руху частинок у закрученому потоці, що враховує їх випаровування та зміну траєкторії. Отримано аналітичні залежності для визначення ефективності процесу осадження. Досліджено вплив конструктивних параметрів апарата та характеристик потоку на загальну продуктивність процесу. Представлені результати можуть бути використані для оптимізації конструкцій розпилювальних систем та підвищення ефективності промислових процесів.

Ключові слова: пиловловлення; циклонний пиловловлювач; математичне моделювання; ефективність розпилення; траєкторія частинок.

Постановка проблеми. Рух частинок у циклонних розпилювальних апаратах є складним процесом, що відбувається під впливом низки зовнішніх сил, таких як гравітація, аеродинамічний опір, відцентрова сила, сили взаємодії з потоком та міжчастинкові сили. Врахування всіх цих факторів у математичних моделях є складним завданням через велику кількість параметрів, які змінюються залежно від умов процесу.

Існуючі математичні моделі пиловловлення часто не враховують особливості руху дрібнодисперсних частинок та їхню взаємодію з диспергованим середовищем, що може призводити до похибок у прогнозуванні ефективності процесу. Недостатня деталізація моделей може спричиняти перевитрати енергії або зниження якості очищення газових потоків у промислових установках.

У даній роботі потік повітря в циклонному апараті розглядається як стаціонарний із рівнозмінім кроком по висоті та радіусу камери, що дозволяє спростити математичне моделювання. Основна увага приділяється аналізу основних сил, що діють на частинки: відцентрової, аеродинамічного опору та сил інерції. Врахування цих факторів дозволяє розробити спрощену

математичну модель руху частинок у розпилювальному апараті, що стане основою для подальшої оптимізації конструкції пиловловлювачів та підвищення ефективності очищення газових потоків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема руху частинок у циклонних розпилювальних апаратах залишається актуальною, що підтверджується численними дослідженнями, присвяченими аналізу динаміки частинок у турбулентному потоці та оцінці основних сил, які впливають на їхній рух [1, 2]. Сучасні наукові роботи зосереджуються на вивченні впливу аеродинамічного опору, відцентрової сили та турбулентного масопереносу, які визначають траєкторію частинок у потоках, що обертаються [3].

Окремі дослідження показують, що сила Магнуса, яка виникає внаслідок обертання частинок, може суттєво змінювати їхні траєкторії залежно від параметрів повітряного потоку [4]. Аналіз взаємодії частинок із потоком у рівнозмісних умовах підтверджує необхідність врахування в'язкісного опору та інерційних сил для підвищення точності математичного моделювання процесу пиловловлення [5].

Попри значний прогрес у дослідженнях, сучасні моделі все ще недостатньо враховують вплив міжчастинкових взаємодій, таких як молекулярне тяжіння та електростатичні сили, що може знижувати точність прогнозування ефективності очищення газового потоку [6]. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення моделей шляхом урахування комплексного впливу фізичних факторів, що дозволить підвищити ефективність роботи циклонних апаратів.

Актуальність дослідження. Циклонні розпилювальні апарати широко застосовуються в різних галузях промисловості, де ефективність пиловловлення безпосередньо впливає на продуктивність технологічних процесів. Оптимізація конструкцій таких апаратів дозволяє зменшити енергетичні витрати, підвищити ефективність очищення газових потоків і мінімізувати шкідливі викиди в довкілля.

Вивчення впливу аеродинамічних і інерційних сил на рух частинок у циклонних потоках сприяє вдосконаленню існуючих математичних моделей, що забезпечує точніше прогнозування ефективності пиловловлення. Розробка нових методів оптимізації роботи апаратів є важливою складовою підвищення їх надійності та адаптації до сучасних екологічних і виробничих вимог.

Мета даного дослідження. Метою даного дослідження є аналіз руху частинок у циклонних розпилювальних апаратах з урахуванням їхньої взаємодії з потоком повітря та впливу ключових аеродинамічних і інерційних сил на ефективність пиловловлення.

У межах дослідження здійснено порівняльний аналіз існуючих підходів до математичного моделювання руху частинок, визначено вплив конструктивних параметрів апаратів на ефективність осадження частинок, а також розглянуто методи оптимізації потоків повітря і частинок для підвищення ефективності промислових процесів.

Основною метою є вдосконалення технологій пиловловлення шляхом детального вивчення кінематики частинок у циклонному потоці та розробки моделей, що дозволяють підвищити ефективність процесу та зменшити енергетичні витрати.

Виклад основного матеріалу. Рух частинок у циклонних розпилювальних апаратах, наприклад у дискових розпилювачах є складним криволінійним процесом у просторовому полі швидкостей. На нього впливає значна кількість зовнішніх сил, серед яких гравітаційні, реактивного випаровування, молекулярного тяжіння, електростатичні сили, сили взаємодії частинок між собою та сили, що виникають унаслідок контакту з несучим потоком. До останніх належать сила аеродинамічного опору, протитиску, сили турбулентного масопереносу та сила Магнуса, що з'являється при обертанні частинок навколо власної осі [7].

Оскільки повний урахування усіх чинників у диференціальних рівняннях руху частинок є неможливим, прийнято ряд припущень. Потік повітря в камері розглядається як стаціонарний, з усередненою швидкістю та без інтенсивного турбулентного обміну. Вплив радіального стоку та вторинних вихорів, що можуть захоплювати дрібні частинки до центру камери (рис. 1), не враховується [1].

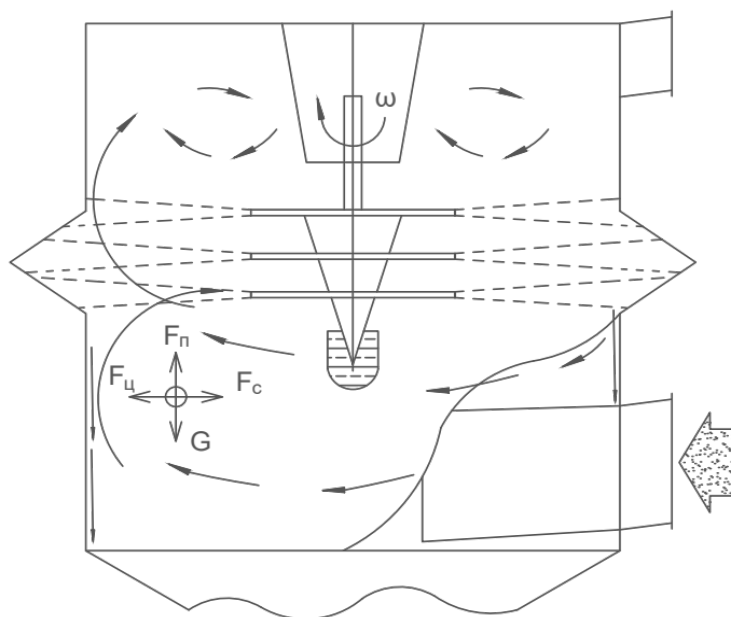


Рис. 1. Схема руху контактуючих фаз у дисковому розпилювачі

Передбачається, що відцентрова сила інерції діє в радіальному напрямку, а тангенціальні та осьові швидкості частинки та повітря в кожний момент часу є рівними між собою.

Величина відцентрової сили інерції визначається за формулою:

$$F_u = \frac{mu^2}{r} \quad (1)$$

Для осадження частинок на корпусі пиловловлювального апарата необхідно, щоб ця сила дорівнювала або перевищувала силу опору середовища, яка відповідно до закону Ньютона визначається як [8]:

$$F_c = \frac{1}{2} \psi \rho u^2 A \quad (2)$$

де ψ – коефіцієнт аеродинамічного опору, що залежить від режиму течії.

Під дією відцентрової сили частинки набувають граничної відносної швидкості, що визначається умовою $F_u \leq F_c$. При встановленні рівноваги, згідно із законом Стокса, рівняння руху частинок набуває вигляду рівняння І.В. Мещерського (рис. 2) [10]:

$$m \frac{du}{dt} = F_u - F_c - F_i \quad (3)$$

де F_u - відцентрова сила інерції; F_c - в'язкий опір середовища; F_i - інерційна сила частинок у радіальному напрямку.

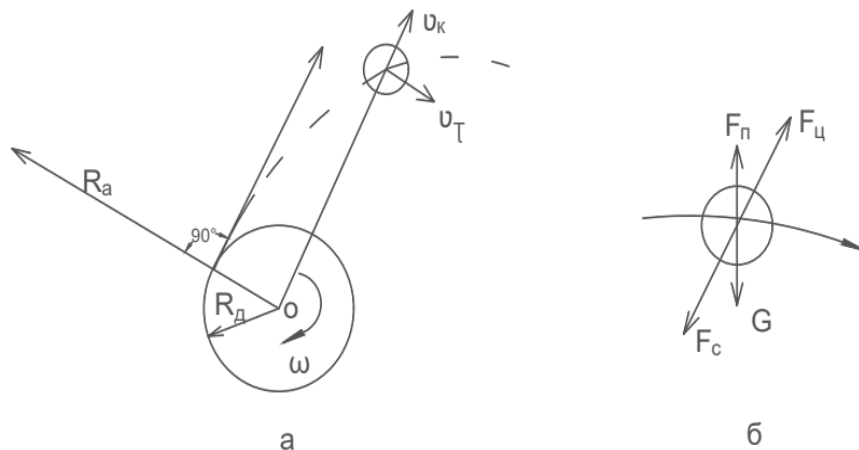


Рис. 2. Схема руху краплі в горизонтальній площині
а - траєкторія руху краплі в потоці, який зносить; б - дія сил на рухому краплю.

Одним із важливих факторів, що визначають поведінку аерозольних систем, є випаровування крапель [11]. Цей процес визначає тривалість існування водяного аерозолі та впливає на ефективність розпилення. Зміна маси краплі у часі описується рівнянням:

$$\frac{dm}{dt} = -\alpha(\rho_s - \rho) \quad (4)$$

де ρ_s – насичений паровий тиск; ρ – тиск навколишнього середовища; α – коефіцієнт масопереносу.

Для оцінки руху частинки разом із газовим потоком в осьовому напрямку визначається крок гвинтового руху [3]:

$$h = 2\pi r \cdot \operatorname{tg} \theta \quad (5)$$

де θ – середній кут підйому спіралі.

Розпилені краплі, потрапляючи в газовий потік, створюють турбулентно-інерційний механізм уловлювання частинок [9]. В ідеалізованій моделі зваженого трифазного шару (рис. 3) приймаються такі припущення:

- краплі нерухомі;
- розташовані у шаховому порядку;
- поле течії встигає встановитися на кожній ділянці шару.

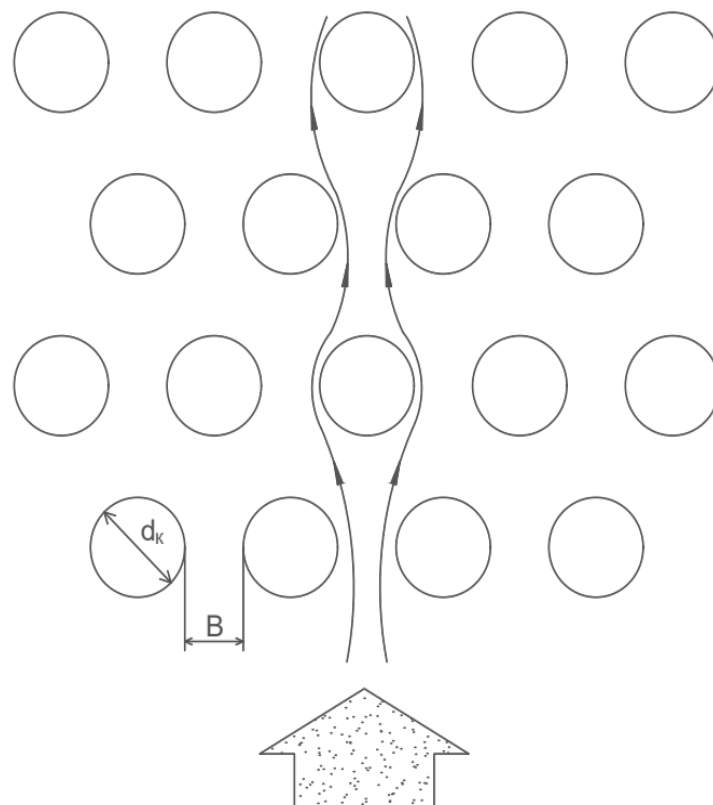


Рис. 3. Поле течії аерозолі в шарі диспергованої рідини дисковим розпилювачем (при ідеалізованій моделі)

Коефіцієнт осадження частинок на одиничній краплі визначається числом Стокса [3]:

$$Stk = \frac{\rho d^2 u}{18\mu} \quad (6)$$

Відповідно, ефективність уловлювання частинок шаром крапель описується виразом:

$$\eta = 1 - e^{-CS_kH} \quad (7)$$

де C – коефіцієнт пропорційності; H – висота шару.

Висота факела розпилю визначається за залежністю:

$$h_f = C_k \frac{u_k}{g} \quad (8)$$

де u_k – швидкість потоку крапельної суміші.

Таким чином, розпилення рідини на дрібні краплі впливає на ефективність пиловловлення та процеси тепломасообміну. Розуміння закономірностей руху частинок у циклонних апаратах дозволяє оптимізувати їх конструкцію, зменшити енергетичні витрати та підвищити ефективність виробничих процесів.

Висновки. У даній статті проаналізовано рух частинок у циклонних розпилювальних апаратах з урахуванням впливу основних сил: відцентрової сили інерції, аеродинамічного опору та турбулентного масопереносу. Запропоновано спрощену модель руху частинок у закрученому потоці, що враховує їхню взаємодію із середовищем та зміну маси при випаровуванні.

Встановлено, що відцентрова сила відіграє ключову роль у процесі осадження частинок на стінках апарата, а ефективність цього процесу визначається співвідношенням між силами інерції та опору середовища. Визначено основні параметри, що впливають на траєкторію частинок, та встановлено умови їхнього переміщення у радіальному й осевому напрямках.

Отримані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення конструкцій розпилювальних апаратів та підвищення ефективності їх роботи в промислових умовах.

Список джерел

1. Пріємов, С.І. (1971). Дослідження роботи мокрого пиловловлювача з дисковим розпилювачем в очищенні вентиляційних викидів. Дисертація. Київський національний університет будівництва і архітектури.
2. Любарець, О.П., Микитенко, М.Р. (2023). Аналіз факторів, що впливають на стан знепилення аспіраційних викидів. *Вентиляція*, Київський національний університет будівництва і архітектури, випуск 46, 89. Джерело: <http://vothp.knuba.edu.ua/article/download/298374/291122> (українською)
3. Ратушняк, Г.С., Лялюк, О.Г. (2009). Пристрої для очищення газових викидів. IV НВКП "Укреліотех", 180.
4. White, P.A.F., Smith, S.E. (1964). High-efficiency air filtration. Butterworths, London, 245.

5. Gairola, R., Rao, D.V. (2013). Design of industrial ventilation systems for dust control. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 10(1), 43–50. <http://doi.org/10.1080/15459624.2012.731131>.
6. Семенов, В.С., Любарець, О.П. (1982). Використання вентиляційних систем в промислових умовах. Український науково-дослідний інститут санітарної техніки, Київ.
7. Гаджієв, Е.Н., Варламов, Є.М. (2017). Аналіз дисперсії пилу в аспіраційних системах при виробництві теплоізоляційних матеріалів. Український науково-дослідний інститут екологічних проблем, Харків, 192.
8. Зінич, П.Л., та ін. (2009). Дослідження мокрих скрубберів у промислових аспіраційних системах. *Журнал промислової вентиляції*, 18(2), 101–113.
9. Ma Yuanqing, Li Anguia, Che Jiganga, Wang Tianqia, Yang Changqing, Che Lunfeib, Liu Junb (2023). Investigation of heavy gas dispersion characteristics in a static environment: Spatial distribution and volume flux prediction. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China, <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85162124943&origin=recordpage>.
10. Зіняк, В.В., Ткачук, А.Я. (2001). Технологія очищення пилу в мокрих скрубберах. *Технологічний розвиток вентиляційних систем*, 13, 145–151.
11. MacIntyre, N.R., Branson, R.D. (2008). Mechanical ventilation. Elsevier Canada, 352. <http://doi.org/10.1016/j.vent.2008.02.009>.

PhD student **Mykytenko Maksym**,
Kyiv National University of Construction and Architecture

MATHEMATICAL MODELLING AND ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF PARTICLE MOVEMENT IN CYCLONE SPRAYING DEVICES

The article presents a study of particle motion in cyclone spraying devices, taking into account the influence of the main forces, such as centrifugal inertia, aerodynamic drag and turbulent mass transfer. The mechanism of deposition of particles on the walls of the apparatus, as well as the interaction of particles with the gas flow, is considered. A mathematical model of particle motion in a swirling flow is proposed, which takes into account their evaporation and trajectory changes. Analytical dependences for determining the efficiency of the deposition process are obtained. The influence of the design parameters of the apparatus and flow characteristics on the overall process performance is investigated. The presented

results can be used to optimise the design of spray systems and improve the efficiency of industrial processes.

Keywords: dust collection; cyclone dust collector; mathematical modelling; spray efficiency; particle trajectory.

REFERENCE

1. Priemov, S.I. Doslidzhennia roboty mokroho pylovlovliuvacha z dyskovym rozpyliuvachem v ochyshchenni ventyliatsiinykh vykydiv: Dysertatsiia kandydata tekhnichnykh nauk. Kyiv, 1971. 196 p. {in Russian}
2. Mykytenko, M.R., Lyubarets, O.P. Analiz skladovykh chynnykiv, shcho vplyvayut' na stan znepylenya aspiratsiinykh vykydiv. *Ventilyatsiya, osvittlennya ta teplohapostachannya*. № 46. Kyiv: KNUBA, 2023 p. 89–100. URL: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.46>. {in Ukrainian}
3. Ratushniak, H.S., Lialiuk, O.H. Prystroi dlia ochyshchennia hazovykh vykydiv. Kyiv : NVKP "Ukrheliotekh", 2009. 180 p. {in Ukrainian}
4. White P.A.F. High-efficiency air filtration. / ред. Smith, Sydney Ernest, 1918- joint ed. London : Butterworths, 1964. 314 p. {in English}
5. Industrial Ventilation News Digest. Applied Industrial Hygiene. 1986. T. 1, № 1. C. F–40–F–43. URL: <https://doi.org/10.1080/08828032.1986.10390454>. {in English}
6. Kouzov P.A. Ochyshchennia vid pylu haziv ta povitria v khimichnii promyslovosti. L., 1982. 255 p. {in Russian}
7. Hadzhiev E., Varlamov E. Dispersion analysis of dust in aspiration systems in the production of thermal insulation materials using advanced experimental equipment. *Ecological Sciences*. 2019. T. 1, № 2. C. 27–31. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-1-24-2-6>. {in English}
8. Balternas P.B. Obezpyliuvannia povitria na pidpriemstvakh budmaterialiv. M.: «Budvydat», 1991. 184 p. {in Russian}
9. Investigation of heavy gas dispersion characteristics in a static environment: Spatial distribution and volume flux prediction / Y. Ma and other. *Building and Environment*. 2023. p. 110501. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110501>. {in English}
10. Ziniak V.V., Tkachuk A.Ia. Tekhnolohiia ochyshchennia pylu v mokrykh skruberakh. *Tekhnolohichni rozvytok ventyliatsiinykh system*. № 13. 2001. p. 145–151. {in Ukrainian}
11. MacIntyre, N.R., Branson, R.D. Mechanical Ventilation. Elsevier, 2008. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-7216-0186-1.x5001-7>. {in English}