

Моделювання бункеру динамічного пиловловлюючого апарату

А. В. Карамушко

<https://doi.org/10.31174/SEND-NT2018-157V117-13>

Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса, Україна

Corresponding author. E-mail: karamushko@opu.ua

Paper received 26.01.18; Accepted for publication 30.01.18.

Анотація. Бункер є невід’ємною частиною відцентрових пиловловлювачів, яка впливає на загальну ефективність їх роботи. У роботі визначені критерії моделювання з врахуванням факторів, що можуть впливати на ефективність пиловловлювання у інерційних апаратах. За результатами фізичного моделювання отримано основне критеріальне рівняння для корисного об’єму бункеру.

Ключові слова: інерційне осадження, коефіцієнт пиловловлювання, бункер пиловловлювача.

Вступ. На сучасному етапі розвитку суспільства однією з загроз екологічній безпеці, як складовій національної безпеки, є нерациональне, виснажливе використання мінерально-сировинних природних ресурсів та неефективність заходів щодо зменшення наслідків техногенного навантаження на навколишнє природне середовище. За даними ВООЗ, через поганий стан довкілля кожні дві години в Україні помирають три людини, а за висновками Всесвітнього економічного форуму, через високий рівень забрудненості атмосферного повітря Україна може втрачати до 15 % врожаю. Згідно державній статистичній звітності, основними забруднюючими речовинами атмосферного повітря є оксиди азоту і вуглецю, діоксид та інші сполуки сірки, а також пил, які викидаються переважно підприємствами переробної і добувної промисловості та підприємствами енергетичної галузі. Причому кількість випадків перевищення суб’єктами господарської діяльності встановлених нормативів гранично допустимих викидів останнім часом збільшується. До основних причин такого стану речей можна віднести порушення режиму експлуатації пилогазоочисного обладнання або взагалі його відсутність. Окрім того, як зафіксовано у Національній стратегії наближення (апроксимації) законодавства України до права ЄС у сфері охорони довкілля, концентрація пилу залишається поза правовим регулюванням у забезпеченні якості атмосферного повітря

На відміну від національного законодавства, Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 року про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи передбачає встановлення граничної величини і зменшення впливу дрібнодисперсного пилу (PM_{10} та $PM_{2,5}$) з метою захисту здоров’я людини та навколишнього природного середовища в цілому. Із підписанням Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, Україна взяла на себе зобов’язання вживати заходів для поступового наближення національних нормативів екологічної безпеки до вимог Європейського Союзу. Отже, зниження забруднення повітря техногенним пилом є актуальною науково-технічною задачею.

Короткий огляд публікацій за темою. Для вирішення проблеми забруднення повітря пилом проєктують системи аспірації, основним елементом яких є пиловловлюючий апарат. Для забезпечення екологічних вимог до якості повітря при проєктуванні необхідну увагу приділяють не лише коефіцієнту вловлювання

у пиловловлюючому апараті, а й правильному улаштуванню пилозбірного контейнеру – бункеру. В роботах [1–3] було доведено, що бункер є невід’ємною частиною відцентрових пиловловлювачів, в якій продовжується процес сепарації пилу, і за його допомогою забезпечується стабільна робота всієї пиловловлюючої системи.

Один з етапів конструювання бункера – це визначення його мінімального (корисного) об’єму, який зводиться до визначення об’єму вловленого пилу за одиницю часу. Значення об’єму вловленого пилу напряму залежить від необхідної ефективності очищення газу. Оскільки універсальних пиловловлювачів, тобто здатних вловлювати усі види пилу у будь-яких умовах з однаково високою ефективністю, не існує, тому з’являється необхідність при розрахунках враховувати фізико-механічні властивості пилу, який вловлюється, та технологічні параметри газу, який очищується.

Мета. Метою дослідження є визначення основного параметру бункеру – корисного об’єму з врахуванням основних факторів, що впливають на ефективність інерційних пиловловлювачів. Для досягнення мети необхідно було визначити основні фізико-механічні властивості пилу та технологічні параметри газу; розрахувати коефіцієнт вловлювання пилу; визначити критерії моделювання.

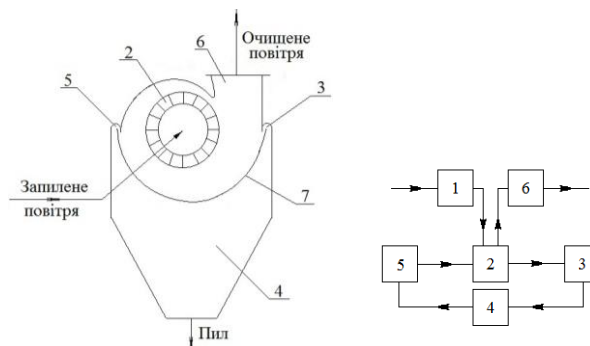


Рис. 1. Експериментальний стенд: 1 – вхідний патрубок; 2 – робоче колесо вентилятору; 3 – щілина для відводу запиленого газового потоку; 4 – бункер пиловловлювача; 5 – щілина для відводу очищеного від пилу газового потоку; 6 – вихідний патрубок; 7 – корпус вентилятору.

Матеріали та методи. Основні результати дослідження отримані методом фізичного моделювання. Дисперсний склад пилу встановлювався ситовим аналізом з ручним просівом. Насипна густина пилу була визначена за методикою наведеною в [4]. Розрахунок параметрів пилогазової суміші вівся на основі теорії механіки рідини та газу. Для визначення критеріїв

модельовання використовувався метод аналізу розмірностей.

Результати та їх обговорення. Для досягнення мети дослідження був змонтований експериментальний стенд, схема якого наведена на рис. 1.

Стенд працює наступним чином. Пилогазова суміш через вхідний патрубок 1 направляється в робоче колесо вентилятору 2 і набуває криволінійну траєкторію руху. Під дією відцентрових сил частинки пилу концентруються на периферії корпусу вентилятору 7 та разом з невеликою кількістю газів (10–15 %) відводяться через щілину 3 в бункер пиловловлювача 4, інша частина газу через вихідний патрубок 6 виводиться з нагнітача пиловловлювача. В бункері частинки пилу під дією сил тяжіння осідають, а очищене повітря повертається у проточну частину вентилятору через щілину 5. Експериментальний стенд може працювати за прямою схемою, коли очищене повітря через вихідний патрубок викидається в атмосферу, та циркулюючою, коли очищене повітря знову подається у вхідний патрубок. При заповненні бункеру пилом між вільною поверхнею пилу та криволінійною поверхнею корпусу вентилятору утворюється дифузотно-конфузотний криволінійний канал з циркулюючим контуром. Поступово канал змінного перерізу перетворюється у криволінійний канал сталого перерізу і пил не сепарується з циркулюючого запиленого потоку.

Основним параметром, що підлягав визначенню, був коефіцієнт вловлювання пилу, який розраховувався за формулою

$$\eta = \frac{m_{\text{вл}}}{m_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

де $m_{\text{вл}}$ – маса пилу, який осів у бункері, кг;
 $m_{\text{вх}}$ – маса пилу на вході в пиловловлювач, кг.

Для визначення коефіцієнту вловлювання пилу у бункері використовували три проби пилу, дисперсний склад якої наведено в табл. 1: вугільна зола з насипною густиною 990 кг/м³ та медіанним розміром частинок пилу 85 мкм; крохмаль з насипною густиною 560 кг/м³ та медіанним розміром частинок пилу 45 мкм; шліфувальний пил з насипною густиною 210 кг/м³ та медіанним розміром частинок пилу 50 мкм.

Таблиця 1. Дисперсний склад експериментального пилу

Розмір отворів у ситі, мкм	% частинок в складі пилу		
	зола	крохмаль	шліфувальний пил
>100	56,5	0	18
100–63	30	7	26
63–50	8,5	1	13
50–40	3,5	71	7
<40	1,5	21	36

Експериментальний стенд працював за прямою схемою. Пил масою 100 г з джерела подавався у робоче колесо вентилятору через вхідний патрубок. Установка працювала до повного опорожнення джерела пилу. Після припинення роботи пиловловлювача пил, який осів в бункері і який вилетів через вихідний патрубок, зважувався на електронних вагах. Результати експерименту для подальшого розрахунку наведені у табл. 2. Бачимо, що зниження витрати запиленого газу і збільшення витрати пилу приводить до зниження кое-

фіцієнта виносу пилу і зменшення викидів в атмосферу.

Таблиця 2. Результати експериментального визначення коефіцієнта вловлювання пилу у прямоючній пиловловлюючій системі

Параметр \ Пил	Пил 1	Пил 2	Пил 3	Пил 4
	$Q \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с}$	9,374	12,222	12,222
$\Delta P, \text{ Па}$	16	37	37	16
$C_0, \text{ г/м}^3$	75,85	199,56	221,134	17,815
$d, \text{ мкм}$	85	50	45	80
$\rho, \text{ кг/м}^3$	990	210	560	210
$w, \text{ см/с}$	28,98	1,7	2,53	4,36
η	91,4	29	38	40

Огляд літературних джерел дозволив виділити основні фактори, що впливають на ефективність інерційних пиловловлювачів. Серед них можна виділити технологічні (Q – витрата запиленого газу, м³/с; ΔP – гідравлічний опір пиловловлювача, Па; C_0 – початкова масова концентрація пилу, г/м³) та фізико-механічні параметри (d – медіанний розмір частинки пилу, мкм; ρ – густина пилу, кг/м³; w – середня швидкість паріння частинки пилу, см/с). Об'єм вловленого пилу за одиницю часу становить

$$V = \frac{C_0 Q}{\rho} \eta, \quad (2)$$

тобто $V = f_1(Q, \Delta P, C_0, d, \rho, w)$,

або $f_2(V, Q, \Delta P, C_0, d, \rho, w) = 0$.

Таким чином, процес вловлювання пилу в бункері пиловловлюючого апарату буде визначатися чотирма критеріями подібності

$$f_3(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0.$$

$$\pi_1 = V \rho^{x_1} Q^{y_1} d^{z_1}.$$

$$\dim \pi_1 = L^3 T^{-1} (ML^{-3})^{x_1} (L^3 T^{-1})^{y_1} L^{z_1} = L^{3-3x_1+3y_1+z_1} T^{-1-y_1} M^{x_1}.$$

Тоді

$$\begin{cases} 3-3x_1+3y_1+z_1=0 \\ -1-y_1=0 \\ x_1=0 \end{cases} ; \begin{cases} z_1=0 \\ y_1=-1 \\ x_1=0 \end{cases}.$$

Отже, $\pi_1 = \frac{V}{Q}$.

$$\pi_2 = \Delta P \rho^{x_2} Q^{y_2} d^{z_2}.$$

$$\dim \pi_2 = ML^{-1} T^{-2} (ML^{-3})^{x_2} (L^3 T^{-1})^{y_2} L^{z_2} = L^{-1-3x_2+3y_2+z_2} T^{-2-y_2} M^{1+x_2}$$

Тоді

$$\begin{cases} -1-3x_2+3y_2+z_2=0 \\ -2-y_2=0 \\ 1+x_2=0 \end{cases} ; \begin{cases} z_2=4 \\ y_2=-2 \\ x_2=-1 \end{cases}.$$

Отже, $\pi_2 = \frac{\Delta P d^4}{\rho Q^2}$.

$$\pi_3 = C_0 \rho^{x_3} Q^{y_3} d^{z_3}.$$

$$\dim \pi_3 = ML^{-3} (ML^{-3})^{x_3} (L^3 T^{-1})^{y_3} L^{z_3} = L^{-3-3x_3+3y_3+z_3} T^{-y_3} M^{1+x_3}$$

Тоді

$$\begin{cases} -3 - 3x_3 + 3y_3 + z_3 = 0 \\ -y_3 = 0 \\ 1 + x_3 = 0 \end{cases} ; \begin{cases} z_3 = 0 \\ y_3 = 0 \\ x_3 = -1 \end{cases}$$

Отже, $\pi_3 = \frac{C_0}{\rho}$. Враховуючи (2), отримуємо $\pi_1 = \pi_3 \eta$.

$$\pi_4 = w \rho^{x_4} Q^{y_4} d^{z_4}$$

$$\dim \pi_4 = LT^{-1} (ML^{-3})^{x_4} (LT^{-1})^{y_4} L^{z_4} = L^{1-3x_4+3y_4+z_4} T^{-1-y_4} M^{x_4}$$

Тоді

$$\begin{cases} 1 - 3x_4 + 3y_4 + z_4 = 0 \\ -1 - y_4 = 0 \\ x_4 = 0 \end{cases} ; \begin{cases} z_4 = 2 \\ y_4 = -1 \\ x_4 = 0 \end{cases}$$

Отже, $\pi_4 = \frac{wd^2}{Q}$.

Таким чином, $\pi_3 \eta = A \pi_2^a \pi_3^b \pi_4^c$,

або $\frac{C_0}{\rho} \eta = A \left(\frac{\Delta P d^4}{\rho Q^2} \right)^a \left(\frac{C_0}{\rho} \right)^b \left(\frac{wd^2}{Q} \right)^c$.

Позначимо $\frac{C_0}{\rho} \eta = K$, $\frac{\Delta P d^4}{\rho Q^2} = L$, $\frac{C_0}{\rho} = M$, $\frac{wd^2}{Q} = N$,

тоді

$$K = AL^a M^b N^c$$

Прологарифмуємо рівняння:

$$\ln K = \ln A + a \ln L + b \ln M + c \ln N$$

Позначимо $\ln K = \lambda$, $\ln A = \varphi$, $\ln L = \alpha$, $\ln M = \beta$

, $\ln N = \gamma$, тоді $\lambda = \varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma$.

Для визначення коефіцієнтів φ, a, b, c використовуємо результати експериментальних досліджень, що наведені в табл. 2, та метод найменших квадратів.

Запишемо систему рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial R}{\partial \varphi} = 2 \sum (\varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma - \lambda) \cdot 1 = 0 \\ \frac{\partial R}{\partial \alpha} = 2 \sum (\varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma - \lambda) \cdot \alpha = 0 \\ \frac{\partial R}{\partial \beta} = 2 \sum (\varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma - \lambda) \cdot \beta = 0 \\ \frac{\partial R}{\partial \gamma} = 2 \sum (\varphi + a\alpha + b\beta + c\gamma - \lambda) \cdot \gamma = 0 \end{cases}$$

або

$$\begin{cases} 4\varphi + a \sum \alpha + b \sum \beta + c \sum \gamma = \sum \lambda \\ \varphi \sum \alpha + a \sum \alpha^2 + b \sum \beta \alpha + c \sum \gamma \alpha = \sum \lambda \alpha \\ \varphi \sum \beta + a \sum \alpha \beta + b \sum \beta^2 + c \sum \gamma \beta = \sum \lambda \beta \\ \varphi \sum \gamma + a \sum \alpha \gamma + b \sum \beta \gamma + c \sum \gamma^2 = \sum \lambda \gamma \end{cases} \quad (3)$$

Результати розрахунку коефіцієнтів, що входять у систему (3), наведені у табл. 3.

Таблиця 3. Результати розрахунку коефіцієнтів

Коефіцієнти	Пил 1	Пил 2	Пил 3	Пил 4	Σ
α	-31,83	-32,54	-36,29	-30,97	-131,64
β	-9,48	-6,96	-7,84	-9,37	-33,65
γ	-15,09	-19,48	-20,47	-17,33	-72,36
λ	-9,57	-8,20	-8,80	-10,29	-36,86
α^2	1013,28	1058,92	1317,29	959,07	4348,56
$\alpha\beta$	301,66	226,45	284,44	290,33	1102,87
$\alpha\gamma$	480,41	633,80	742,79	536,69	2393,69
$\alpha\lambda$	304,53	266,73	319,56	318,70	1209,51
β^2	89,81	48,42	61,42	87,89	287,54
$\beta\gamma$	143,02	135,54	160,39	162,46	601,41
$\beta\lambda$	90,66	57,04	69,00	96,48	313,18
γ^2	227,77	379,35	418,84	300,32	1326,29
$\gamma\lambda$	144,38	159,65	180,19	178,34	662,56

Підставимо отримані значення коефіцієнтів у систему (3):

$$\begin{cases} 4\varphi - 131,64a - 33,65b - 72,36c = -36,86 \\ -131,64\varphi + 4348,56a + 1102,87b + 2393,69c = 1209,51 \\ -33,65\varphi + 1102,87a + 287,54b + 601,41c = 313,18 \\ -72,36\varphi + 2393,69a + 601,41b + 1326,29c = 662,56 \end{cases} \quad (4)$$

Розв'язав систему рівнянь (4) отримали: $a = -0,162$, $b = 1,0344$, $c = 0,308$, $\varphi = -0,277$, $A = 0,758$.

Тоді основне критеріальне рівняння для визначення корисного об'єму бункеру буде мати вигляд

$$V = 0,758 Q \left(\frac{\Delta P d^4}{\rho Q^2} \right)^{-0,162} \left(\frac{C_0}{\rho} \right)^{1,0344} \left(\frac{wd^2}{Q} \right)^{0,308}$$

Висновки. У пиловловлюючому апараті, який досліджувався, нагнітач та бункер об'єднані одним корпусом. Таким чином в одному апараті поєднано два механізми розподілу двофазного потоку: відцентрове та інерційне осадження. Ефективне вилучення пилу у бункері буде проходити доки випукла стінка корпусу вентилятору і вільна поверхня пилу у бункері не утворять криволінійний канал постійного перерізу.

Для зниження економічних витрат і збільшення ефективності роботи систем аспірації перспективним є використання пиловловлюючих апаратів, спеціально розроблених для уловлювання пилу з визначеними властивостями. Запропонована залежність для розрахунку об'єму вловленого пилу з врахуванням фізико-механічних параметрів пилу і технологічних параметрів пилогозового потоку дозволить зменшити ймовірність виносу пилу з бункеру та запобігти вторинному забрудненню довкілля.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дубинін, А. І. Вплив бункера на ефективність роботи напівпромислового прямотечіного циклону з коаксіальною вставкою / А.І. Дубинін, В. В. Майструк, Р. І. Гаврилів // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Вип. 1/9 (49). – 2011. – С. 20–22.
2. Вплив бункера на ефективність уловлення пилу / В. А. Батлук, В. В. Батлук, Я. В. Мота, С. В. Шибанов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2008. – № 609: Хімія, технологія речовин та їх застосування. – С. 204–207.
3. Серебрянський, Д. О. Підвищення ефективності газоочистки теплових енергетичних установок. : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одеса, 2004. – 19 с.
4. Коузов, П. А. Методы определения физико-химический свойств промышленных пылей / П. А. Коузов, Л. Я. Скрябина. – Л.: Химия, 1983. – 143 с., ил.

REFERENCES

1. Dubynin, A.I., Mastruk, V.V., Havryliv, R.I. Methods of determination of the physical and chemical properties of industrial dust // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2011. Is. 49. P. 20-22. Retrieved from [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2011_1\(9\)_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vejpte_2011_1(9)_6).
2. Butluk, V. A., Butluk, V. V., Mota, Y. V., Shybanov S. V. Effect of the hopper on the effectiveness of dust trapping // Visnyk Lviv Polytechnic National University : Chemistry, technology of substances and their application, 2008. Is. 609. P. 204-207. Retrieved from http://vlp.com.ua/files/51_5.pdf
3. Serebryansky , D.A. (2004). Increasing the gas cleaning efficiency of heat power plants. (Master's thesis). Odessa national polytechnic university, Odessa. Retrieved from: <http://ecologenergy.narod.ru/Download/avtoref.pdf>
4. Kouzov, P.A., & Skriabyna, L.Y. (1983). Methods of determination of the physical and chemical properties of industrial dust. L: Khimiia, 1983. 143 p.

Modeling a hopper for a dynamic dust collecting apparatus

A. V. Karamushko

Abstract. The hopper is an integral part of the centrifugal dust collectors, that affects the overall efficiency of their work. In this work modeling criteria including factors that could affect on effectiveness of dust collection in inertial machines were identified. According to physical modeling results the main criterial equation for useful hopper capacity has been got.

Keywords: *inertial deposition, catching coefficient, hopper for dust collecting apparatus.*

Моделирование бункера динамического пылеулавливающего аппарата

A. В. Карамушко

Аннотация. Бункер является неотъемлемой частью центробежных пылеуловителей, которая влияет на общую эффективность их работы. В работе определены критерии моделирования с учетом факторов, которые могут влиять на эффективность пылеулавливания в инерционных аппаратах. По результатам физического моделирования получено основное критериальное уравнение для полезного объема бункера.

Ключевые слова: *инерционное осаждение, эффективность пылеулавливания, бункер пылеуловителя.*