

## THE EFFECT OF HYDRODYNAMIC SEPARATION (WET SCRUBBING) OF FINE PARTICULATE MATTER AND ITS IMPACT ON HUMAN HEALTH

Ismail Mehmedov

Technical University – Varna, Bulgaria, imehmedov.me@tu-varna.bg

**Abstract:** The utilization of cyclones for fine particulate matter (PM) separation is becoming increasingly indispensable and necessary for the preservation of human health in the developed industrial world. Designing a system capable of achieving 100% separation efficiency across all elements is a formidable task, primarily due to the complex nature of the underlying physical phenomena that govern particle capture dynamics. These phenomena directly influence particle collection. The necessity for this separation process is of high significance, given that particulate exposure can trigger serious respiratory system pathologies such as asthma and bronchitis, as well as cardiovascular disorders. Beyond the negative impact on the human body, dust contamination affects soil and water resources. Furthermore, the accumulation of dust on machinery and mechanisms leads to accelerated wear, overheating, and subsequent failures. The implementation of effective PM separation systems is critical in various industries, including the food processing industry, cement manufacturing, woodworking, and metallurgy, among others. Fine particulate matter, such as wood and metal dust, can be explosive in the presence of a spark or elevated temperature. Mechanical separators are generally favored due to their relatively simple design for manufacture and maintenance.

The Subject of the research focuses on the efficiency, kinetics, and operational parameters of the hydrodynamic (wet) separation process for fine particulate aerosols with a size range of  $2,5 \mu\text{m} \div 10 \mu\text{m}$ , including the correlation between the degree of separation achieved and the reduction of pathogenic impact on the human organism.

The Object of the research is the process of hydrodynamic purification of the air stream from aerosol contaminants and the subsequent impact of the treated air quality on public health.

The Goal of the report is the comprehensive investigation of the mechanism in sequentially connected cyclones when hydrodynamic (wet) capture of the fine particulate matter is present, with the purpose of determining the method's applicability for improving air quality and minimizing the associated ecological risk to human health. To achieve this goal, the following specific tasks have been set:

- Theoretical analysis of the kinetics and the physicochemical foundations of the aqueous capture process of aerosol particles.
- Experimental determination of the separation coefficient (efficiency) by varying the hydrodynamic and aerodynamic parameters of the installed system.
- Scientific substantiation of the correlation between the enhanced air quality and the potential reduction in health risk (respiratory and cardiovascular diseases).
- Formulation of conclusions and recommendations for the practical implementation of the method in industrial and/or domestic air purification systems.

Cyclones utilize centrifugal force to separate particles from the gas flow. Smooth internal surfaces facilitate this separation due to the induced air vortex, which forces particles to migrate along the cyclone walls. The particles accumulate on the walls and are collected in the reservoir mounted beneath the cyclone. The flow within a cyclone is characterized by a dual-vortex movement: the first primary zone is the free vortex motion along the outer surface of the cyclone, while the second zone is the internal rotating vortex, which exhibits a more complex flow pattern.

**Keywords:** Cyclone, modelling, design, separation, efficiency

## ВЪЗДЕЙСТВИЕТО НА ХИДРОДИНАМИЧНОТО СЕПАРИРАНЕ (МОКРО ПРЕЧИСТВАНЕ) НА ФИНИ ТЪВРДИ ЧАСТИЦИ И НЕГОВОТО ВЛИЯНИЕ ВЪРХУ ЧОВЕШКОТО ЗДРАВЕ

Исмаил Мехмедов

Технически университет – Варна, България, imehmedov.me@tu-varna.bg

**Резюме:** Използването на циклони за сепариране на фини твърди частици (PM) става все по-необходимо и незаменимо за опазването на човешкото здраве в развития индустриален свят. Проектирането на система, способна да постигне 100% ефективност на сепарация за всички елементи, представлява значително предизвикателство поради сложния характер на физичните явления, които определят динамиката на улавяне

на частиците. Тези явления оказват пряко влияние върху процеса на отделяне. Необходимостта от подобни системи е от висока значимост, тъй като излагането на фини прахови частици може да доведе до сериозни заболявания на дихателната система като астма и бронхит, както и до сърдечно-съдови нарушения. Освен негативното въздействие върху човешкия организъм, праховото замърсяване влияе и върху почвените и водните ресурси. Натрупването на прах върху машини и механизми води до ускорено износване, прегряване и последващи повреди. Ефективното сепариране на прахови частици е от критично значение за редица индустрии като хранително-вкусовата промишленост, производството на цимент, дървообработването, металургията и други. Фини прахови частици като дървесен и метален прах могат да бъдат експлозивни при наличие на искра или повишена температура. Механичните сепаратори обикновено са предпочитани поради относително простия си дизайн, който улеснява производството и поддръжката.

Предмет на изследването е ефективността, кинетиката и експлоатационните параметри на хидродинамичното (мокро) сепариране на фини аерозолни частици в диапазона  $2,5 \mu\text{m} \div 10 \mu\text{m}$ , включително корелацията между постигнатата степен на почистване и намаляването на патогенния ефект върху човешкия организъм.

Обект на изследването е процесът на хидродинамично пречистване на въздушния поток от аерозолни замърсители и последващото влияние на качеството на пречистения въздух върху общественото здраве.

Целта на доклада е цялостното изследване на механизма в последователно свързани циклони при наличие на хидродинамично (мокро) улавяне на фини прахови частици, с цел определяне на приложимостта на метода за подобряване на качеството на въздуха и минимизиране на свързания екологичен риск за човешкото здраве. За постигане на тази цел са формулирани следните задачи:

- Теоретичен анализ на кинетиката и физикохимичните основи на процеса на водно улавяне на аерозолни частици.
- Експериментално определяне на коефициента на сепариране (ефективност) чрез вариране на хидродинамичните и аеродинамичните параметри на инсталираната система.
- Научна обосновка на корелацията между подобреното качество на въздуха и потенциалното намаляване на здравния риск (респираторни и сърдечно-съдови заболявания).
- Формулиране на изводи и препоръки за практическото приложение на метода в индустриални и/или битови системи за пречистване на въздух.

Циклоните използват центробежна сила за отделяне на частиците от газовия поток. Гладките вътрешни повърхности улесняват този процес благодарение на индуцирания въздушен вихър, който принуждава частиците да мигрират по стените на циклона. Частиците се натрупват по стените и се събират в резервоара, монтиран под циклона. Потокът в циклона се характеризира с движение на два вихъра: първият е свободен външен вихър, който се движи по периферията на циклона, а вторият е вътрешният въртящ се вихър, който се отличава с по-сложна структура.

**Ключови думи:** циклон, моделиране, проектиране, сепариране, ефективност

## 1. ВЪВЕДЕНИЕ

При изследването на циклоните по експериментален път най-добре се определя тяхната максимална ефективност. По време на проучването се използва същата апаратура за създаване на силата на засмукване за да се пресъздаде среда, близка до работната – на фирмата. Използването на същата прахосмукачка при експериментите гарантира, че фирмата, която използва сепаратора за нейните основни дейности, ще постигне същите резултати по време на експлоатация. След анализ на предишни експериментални резултати се стремим да определим модел на сепаратор и/или комбинация от такива за по-ефективно сепариране на фините прахови частици.

Основната цел на статията е да се разгледат (изследват) съществуващи конструкции, при последователно свързване и добавяне на воден резервоар, за сепариране на остатъчните частици след първия циклон. Тази комбинация от свързване ще позволи да се филтрират най-трудно сепариращите елементи и да се уловят над 90%, дори и до 100% .

За да се постигне целта на максимално сепариране, трябва да се решат следните задачи:

- да се подберат най-ефективните конструкции;
- да се създадат няколко варианта водни резервоара, за да се определи най-добрата им конструкция;
- да се обърне внимание, има ли пад на налягането на засмукване;
- да се формират ясно препоръките или да се предвидят стъпките за последващо проектиране, изпитване на циклони за сепариране на частици.

След провеждане на изследването ще е налична база за сравнение на последователно свързване на циклони и ще се определи как влияе това върху сепарирането, и включително добавянето на втори резервоар, а именно – воден.

## 2. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

За целите на експеримента са използвани проектираните циклони с помощта на CAD/CAM софтуер за 3D моделиране в среда (SolidWorks), като са произведени с 3D принтер модел Raise3D Pro2.

Моделите, които използваме са 3A и 1A, където ще се проведат експериментални изследвания за възможността на сепариране на два материала – пясък и пепел. Сглобената единица е показана на фиг. 1.

Спецификата на изследваните материали е, че имат много фина структура и са летливи, и най-вече пепелта, и затова инерционният момент в сепаратора не успява да улавя на 100% тези материали и по тази причина са проведени експерименти с последователно свързани циклони, за да се постигне по-голям резултат. Материалите за изследване са показани на фигура 2.

*Фиг. 1. Изследвана компоновка*



Източник: Авторска снимка

*Фиг. 2. Материали, използвани за сепариране*



Източник: Авторска снимка

Използваните уреди при експеримента са:

- циклони 1А, 3А;
- електронна везна модел HG09959B;
- прахосмукачка модел Karcher T7/1 classic със следните параметри: вакуум 235 Мбар; дебит на въздуха 40 л/с; обем на контейнера 7 л;
- цифров хронометър NUODWELL.

### 3. РЕЗУЛТАТИ

Експериментът се провежда при еднакво количество на изследваните материали, като се следи влажността на материала. При всяко изпитване на възможността на сепариране на системата се прави проверка на количеството материал. След всяко изпитване се измерва отново количеството изпитван материал и се проверява, къде са загубите, ако има такива. Щателно се проверяват всички резервоари и филтърът на прахосмукачката. Резултатите от изследванията са показани на табл. 1.

*Табл. 1. Данни от изследването*

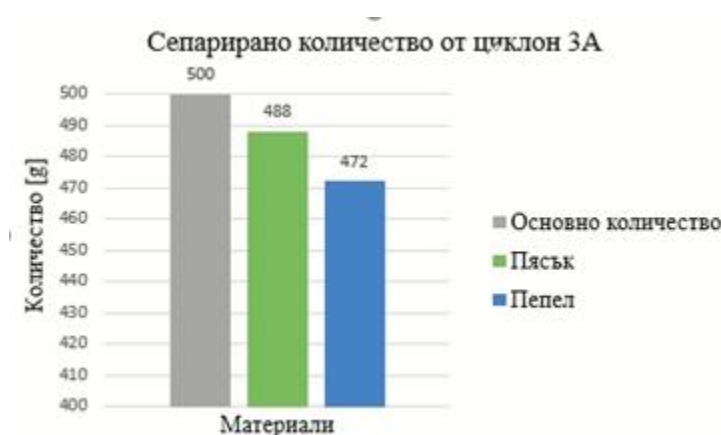
| Материали | Основно количество [g] | Сепарирано количество след 3А [g] | Сепарирано количество с 1А [g] | Общо количество [g] | Време [S] |
|-----------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|-----------|
| Пясък     | 500                    | 488                               | 11                             | 499                 | 7,11      |
| Пепел     | 500                    | 472                               | 25                             | 497                 | 10,85     |

Източник: Авторска табела

### 4. ДИСКУСИЯ

След като са проведени лабораторни изпитвания, резултатите са представени в графичен вид на следващите фигури 4 и 5. Ефектът от сепарирането на двата материала е постигнат с помощта на последователно свързани циклони, като вторият е с воден резервоар и дава възможност да се сепарира 100 % от изследвания материал. По този начин се намалява възможността от респираторни заболявания.

*Фиг. 4. Сепарирано количество от 3А*



Източник: Авторска диаграма

След като модел 3А успява да сепарира по-голямото количество материал, то за следващия циклон остава по-малко количество за улавяне. Включването на два циклона, които да работят последователно, като вторият да има воден резервоар, позволява да се намали възможността остатъчното количество да достигне до резервоара на прахосмукачката. Данните, изнесени в таблица 1, са доказателство, че се сепарират 100 % от целия материал. Разликата от няколко грама е вследствие остатъчния материал, полепнал по тръбопроводите.

Резултатите от изследването показват, че комбинацията на два циклона 3А и 1А осигуряват почти пълно отделяне на изследваните материали от въздушния поток. Това е предпоставка за голяма ефективност на

системата. Анализирайки резултатите се подчертава, че по-лесно се сепарира пясъкът, в сравнение с пепелта, като това се дължи на плътността на материала.

Трябва да се подчертае и ролята на втория циклон, който успява да сепарира 100% остатъчния материал и не позволява материалът да се увеличи отново към тръбопровода, благодарение на водния резервоар. Също така е подходящо и времето за сепариране.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Като заключение може да се отбележи, че с проведените лабораторни изследвания се установява система, която позволява последователното свързване на циклони, като тя демонстрира висока ефективност при отделяне на твърдите частици от въздушния поток. Данните, получени след отделянето на частиците по експериментален път, показват, че както при материали с по-висока плътност, така и при фини частици сепарирането надвишава 99% от първоначално постъпилата маса.

Анализът на остатъчните количества показва, че циклон 3А осигурява основното количество отделяне на материала от въздушния поток, докато 1А довършва процеса, намалявайки възможността изходното количество материал да е около нулата.

На база на получените резултати може да се направи следното заключение, че изследваната конфигурация на циклоните е технологично (надеждно) решение за ефективен контрол на праховите емисии. Системата осигурява стабилност и повторяемост на процеса, същевременно намалява риска от разпространение на фини прахови частици и дава възможност за приложение в индустриални системи.

## ЛИТЕРАТУРА

- Bahadar, H., Maqbool, F., Niaz, K., & Abdollahi, M. (2016). Toxicity of Nanoparticles and an Overview of Current Experimental Models, *Iranian Biomedical Journal*, Volume 20, Issue 1 (1-2016), IBJ (2016); 20 (1) :1-11, URL: <http://ibj.pasteur.ac.ir/article-1-1494-en.html>.
- Bingtao, Z. (2009). Modeling pressure drop coefficient for cyclone separators: A support vector machine approach, *Chemical Engineering Science*, Volume 64, Issue 19, 2009, Pages 4131-4136, ISSN 0009-2509, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.06.017>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250909004187>)
- Bregolin, E., Danieli, P., & Masi, M. (2024). Collection Efficiency of Cyclone Separators: Comparison between New Machine Learning-Based Models and Semi-Empirical Approaches. *Waste* 2024, 2, 240-257. <https://doi.org/10.3390/waste2030014>.
- De Oliveira, A. E., & Guerra, V., G. (2021). Electrostatic precipitation of nanoparticles and submicron particles: review of technological strategies, *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 153, (2021), Pages 422-438, ISSN 0957-5820, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.07.043>.
- Diao, Y., & Yang, H. (2021). Gas-cleaning technology // *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Elsevier, 279-371. doi :10.1016/B978-0-12-816673-4.00007-9.
- Dmitriev, A. V., Zinurov, V. E., Dmitrieva, O. S., & Galiev, A. A. (2018). Influence of structural design of elements of a rectangular separator on the efficiency of gas purification from solid particles. *Bulletin of the Technological University*, 21, (9), 58-61. (In Russ.).
- Dovramadjiev, T., Dobрева, D., & Zlateva, R. (2023). ADVANCED APPLICATION OF ERGONOMICS AND HUMAN FACTORS IN ACADEMIC AND SCIENTIFIC ACTIVITIES. *IETI Transactions on Ergonomics and Safety*, 7(1), 49-56. [https://doi.org/10.6722/TES.202304\\_7\(1\).0005](https://doi.org/10.6722/TES.202304_7(1).0005)
- Jiang, Z., Liang, Y., Zhu, S., Zheng, K., Zhu, Y., Yang, D., Wang, H., & Fu, P. (2025). Hydrogen production by suspension self-rotation enhanced pyrolysis of sludge particles in cyclone, *Water Research*, Volume 275, (2025), 123198, ISSN 0043-1354, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123198>.
- Mazyan, W., Ahmadi, A., Jesus, R., D., Ahmed, H., & Hoorfar, M. (2016). Use of ferrous powder for increasing the efficiency of solid particle filtration in natural gas cyclones // *Sep. Sci. Technol.* (2016). 51. P. 2098 – 2104.
- Pandey, S., Wasilewski, M., Mukhopadhyay, A., Prakash, O., Ahmad, A., & Brar, L. S. (2024). Multi-Objective Optimization of Cyclone Separators Based on Geometrical Parameters for Performance Enhancement / *Journals /Applied Sciences /Volume 14 /Issue 5 / (2024) 10.3390/app14052034*.
- Sabirzyanova, L. R., Uriev, A. A., Kharkov, V. V. & Nikolaev, A. N. (2017). Purification of industrial gas emissions from dust in hollow vortex apparatuses. *Bulletin of the Technological University*, 20, (8), 50-52. (In Russ.).
- Satyanand, P., & Lakhbir, S. B. (2022). On the performance of cyclone separators with different shapes of the conical section using CFD, *Powder Technology*, Volume 407, 2022, 117629, ISSN 0032-5910,

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117629>.

(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003259102200523X>)

Zinurov, V., Kharkov, V., Pankratov, E., & Dmitriev, A. (2022). Numerical Study of Vortex Flow in a Classifier with Coaxial Tubes. *Int. J. Eng. Technol. Innov.*, 12, (4), 336-346. doi : 10.46604/ijeti.2022.9568.

Wasilewski, M., & Brar, L. S. (2023). Performance analysis of the cyclone separator with a novel clean air inlet installed on the roof surface, *Powder Technology*, Volume 428, (2023), 118849, ISSN 0032-5910, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118849>.

<https://www.bohrium.com/paper-details/study-on-the-influence-of-spiral-guide-vanes-on-gas-particle-flow-characteristics-in-fcc-cyclone-separator/1039075619616325632-3821> (21.11.2025).

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.25526> (21.11.2025).