

- Inactivation of Tulane virus on Berry Fruits. Food Environ. Virol. 11 214–219. 10.1007/s12560-019-09382-4
22. Kingsley D. H., Perez-Perez R. E., Niemira B. A., Fan X. (2018). Evaluation of gaseous chlorine dioxide for the inactivation of Tulane virus on blueberries. Int. J. Food Microbiol. 273 28–32. 10.1016/j.ijfoodmicro.2018.01.024
23. Liu X., Jiao W., Du Y., Chen Q., Su Z., Fu M. (2020). Chlorine Dioxide Controls Green Mold Caused by *Penicillium digitatum* in Citrus Fruits and the Mechanism Involved. J. Agric. Food Chem. 68 13897–13905. 10.1021/acs.jafc.0c05288
24. Behlau F., Paloschi A., Marin T. G. S., Santos T. A., Ferreira H., Nascimento L. M. D. (2021). Chlorine dioxide, peroxyacetic acid, and calcium oxychloride for post-harvest decontamination of citrus fruit against *Xanthomonas citri* subsp. *citri*, causal agent of citrus canker. Crop Protect. 146:105679. 10.1016/j.cropro.2021.105679
25. Chiabrando V., Giuggioli N., Maghenzani M., Peano C., Giacalone G. (2018). Improving Storability of Strawberries with Gaseous Chlorine Dioxide in Perforated Clamshell Packaging. Polish J. Food Nutrit. Sci. 68 141–148. 10.1515/pjfn-2017-0024
26. Chen S., Wang H., Wang R., Fu Q., Zhang W. (2018). Effect of gaseous chlorine dioxide (ClO₂) with different concentrations and numbers of treatments on controlling berry decay and rachis browning of table grape. J. Food Proces. Preservat. 42:13662. 10.1111/jfpp.13662
27. Zhang B., Huang C., Zhang L., Wang J., Huang X., Zhao Y., et al. (2019). Application of chlorine dioxide microcapsule sustained-release antibacterial films for preservation of mangos. J. Food Sci. Technol. 56 1095–1103. 10.1007/s13197-019-03636-6
28. Lufu R., Ambaw A., Opara U. L. (2020). Water loss of fresh fruit: Influencing pre-harvest, harvest and postharvest factors. Sci. Horticult. 272:109519. 10.1016/j.scienta.2020.109519
29. Yoon J. H., Lee S. Y. (2018). Review: Comparison of the Effectiveness of Decontaminating Strategies for Fresh Fruits and Vegetables and Related Limitations. Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 58 3189–3208. 10.1080/10408398.2017.1354813
- Отримано в редакцію 03.12.2025
Прийнято до друку 18.12.2025
Розміщено в інтернеті 29.12.2025
- Received 03.12.2025
Approved 18.12.2025
Available in Internet 29.12.2025

УДК 532.5:628.511:631.243

DOI: DOI 10.15673/swonaft.v89i2.3405

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛЕНИХ ДЖЕРЕЛ ПИЛОВИДІЛЕННЯ В ЗЕРНОВИХ ТЕРМІНАЛАХ: ВІД ФІЗИКИ ЕЖЕКЦІЇ ДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ КОМБІНОВАНИХ МЕТОДІВ ЗНЕПИЛЕННЯ

¹Гапонюк О.І., д.т.н., проф., ²Ткаченко В.М., здобувач PhD
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

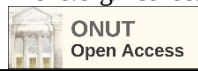
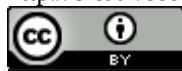
ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-9577-4417>; ²<https://orcid.org/0009-0003-0927-2985>

E-mail: ¹oleg_odessa@me.com; ²vitalis.tkachenko@gmail.com

Copyright © 2025 by author and the journal «Scientific Works»

This work is licensed under Vthe Creative Commons Attribution International License (CC By).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Анотація. У поданій статті здійснено комплексний аналіз проблематики модернізації систем знепилення на сучасних зернових терміналах, де експоненційне зростання інтенсивності вантажопотоків вступає у гострий конфлікт із дедалі жорсткішими екологічними нормативами та імперативами енергоефективності. Автори аргументовано доводять, що традиційна інженерна парадигма, яка базується на застосуванні високоенергоємних аспіраційних мереж для «ліквідації наслідків» пилоутворення, вичерпала свій технічний та економічний ресурс. На основі глибокого дослідження фізики аеродинамічних процесів, зокрема ефектів ежекції та «поришевої» дії гравітаційного потоку зерна, обґрунтовано фундаментальну неспроможність класичних розрахункових моделей (рівняння Далла Валле)

ефективно компенсувати залпові динамічні викиди пилу, що виникають при розвантаженні великотоннажного автотранспорту та грейферній перевалці.

Ключовим науковим внеском роботи є систематизація знань про природу розподілених джерел пилу та обґрунтування переходу до стратегії «стримування та локалізації». Детально проаналізовано механіку трансформації кінетичної енергії падаючого потоку в зону надлишкового статичного тиску, що генерує високошвидкісні радіальні струмені забрудненого повітря. Вперше у вітчизняній практиці запропоновано та деталізовано концепцію трирівневої комбінованої системи захисту, яка інтегрує: 1) механічну герметизацію за допомогою адаптивних клапанних систем (Flex-Flap); 2) аеродинамічне екранування методом контрольованих повітряних завіс; 3) локальну рециркуляцію повітря через модулі інтегральної фільтрації. Результати досліджень демонструють, що впровадження запропонованого підходу дозволяє знизити пікові викиди пилу на 95–98% та зменшити питомі енерговитрати процесу з 1.5–2.0 кВт·год/т до 0.25–0.30 кВт·год/т за рахунок повної елімінації транспортування «баластного» повітря.

Ключові слова: зерновий термінал, пилопригнічення, аспірація, ежекція, повітряна завіса, інтегральна фільтрація, енергоефективність, розподілені джерела пилу, комбінована система аспірації.

Сучасна логістика насипних вантажів переживає етап фундаментальної трансформації, де зростання потужностей перевалки та інтенсифікація вантажопотоків вступають у протиріччя з дедалі жорсткішими екологічними нормами та вимогами енергоефективності. Зерновий пил, що є невід'ємним супутником технологічних операцій, становить не лише санітарно-гігієнічну загрозу та фактор високого вибухопожежного ризику, але й причину значного зносу обладнання.

Традиційно інженерні рішення фокусувалися на локалізації пилу вже після його виходу в робочу зону за допомогою потужних аспіраційних мереж. Однак, як показує практика, такий підхід є "боротьбою з наслідками", що вимагає переміщення величезних мас повітря і значних енерговитрат. Ця проблема набуває особливої гостроти на ділянках прийому з автотранспорту, де процес має циклічний, залповий характер. Скидання великої маси за короткий час створює потужну ежекційну хвилю та піковий викид пилу, який неможливо ефективно вловити стаціонарною аспірацією, розрахованою на середні навантаження. Додатковим ускладненням є габарити транспорту, що унеможливають повну герметизацію.

Специфічні виклики виникають і при залізничному розвантаженні, де зона пиловиділення стає розподіленим лінійним джерелом. У напіввідкритих галереях виникає "тунельний ефект", що посилює винесення пилу вітром, а також аеродинамічний конфлікт, коли витіснене повітря рухається назустріч потоку зерна.

Ключовою проблемою є те, що пил у цих випадках генерується не механічно, а внаслідок аеродинамічної взаємодії падаючого продукту з повітрям (ежекційні джерела). Фізика цих процесів вимагає зміни інженерної парадигми: переходу від енергоємної стратегії "видалення повітря" до стратегії "стримування та локалізації" [2,3]. Розв'язання цієї проблеми є критичним для створення енергоефективних та екологічно безпечних зернових терміналів.

Проблема знепилення на зернових терміналах тривалий час розглядалася в науковій літературі та інженерній практиці крізь призму теорії локальної аспірації. Фундаментальні підходи, що сформували галузеві стандарти, базувалися на принципах примусового видалення запиленого повітря із зони пилоутворення. Традиційним методом розрахунку систем аспірації залишається використання емпіричних залежностей, зокрема формули Далла Валле [6], яка визначає необхідну витрату повітря (Q) як функцію швидкості захоплення (V) та відстані до джерела $Q = V \cdot (10X^2 + A)$. Цей підхід, орієнтований на створення розрідження в укриттях, довів свою ефективність для фіксованих точкових джерел (норії, конвеєрні пересипи), проте виявився недостатньо ефективним в умовах сучасної портової логістики.

Аналіз технічної документації та експлуатаційних показників діючих терміналів свідчить, що традиційні аспіраційні системи мають критичні вади при роботі з нестаціонарними потоками. Дослідники вказують на надмірну енергоємність таких рішень, де питомі витрати енергії можуть сягати 1.5–2.0 кВт·год/т. Основною причиною є необхідність транспортування величезних об'ємів "баластного" повітря (до 95–99% від загального потоку) для вловлювання відносно незначної кількості пилу. Крім того, висока швидкість всмоктування (понад 2.5 м/с), необхідна для утримання важких частинок у потоці, часто призводить до захоплення кондиційного зерна, що вимагає впровадження додаткових ступенів сепарації.

Якісно новий етап у розумінні проблеми започаткували дослідження природи так званих розподілених (ежекційних) джерел. У працях [1,2] було обґрунтовано, що в зонах масового скидання вантажів домінуючим механізмом пилоутворення є не механічне руйнування, а аеродинамічна індукція повітря. Науковці описують цей процес як роботу своєрідного "поршня": гравітаційний потік зерна через сили в'язкого тертя захоплює прикордонні шари повітря, формуючи турбулентний шлейф.

Дослідження [1,2,3] деталізують фізику цього явища, виділяючи критичні фази процесу: прискорення

масиву, удар об поверхню та радіальне розтікання. Встановлено, що кінетична енергія падаючого потоку при контакті з приймальною поверхнею трансформується у зону надлишкового статичного тиску. Стиснене повітря, насичене дрібнодисперсними частинками (PM10), шукає шляхи найменшого опору і виринає назовні через найменші нещільності у вигляді високошвидкісних струменів. Кількісною характеристикою цього процесу, запропонованою в літературі, є коефіцієнт специфічного ув'язування повітря (SE), який демонструє, що при залпових скиданнях (наприклад, з автотранспорту) об'єм витісненого повітря може миттєво зростати до значень, які стаціонарна аспірація фізично не здатна компенсувати.

Окремий пласт досліджень присвячено специфіці джерел емісії. Для автомобільного прийому характерна циклічність та пікові навантаження, коли скидання 20–60 тонн вантажу створює потужну ежекційну хвилю, яку неможливо локалізувати через відкриті борти транспорту. У контексті залізничного розвантаження науковці виділяють проблему "тунельного ефекту" в галереях та аеродинамічного конфлікту, коли висхідні потоки витісненого повітря рухаються назустріч гравітаційному потоку зерна. Найбільш критичним, згідно з екологічними моніторингами, визнано рейферне розвантаження суден, де значна висота падіння та вітрове навантаження унеможливають використання пасивних укриттів.

Попри наявність теоретичної бази щодо фізики ежекції, аналіз публікацій виявляє суттєву прогалину в розробці комплексних інженерних рішень. Існуючі методи здебільшого пропонують або повну герметизацію (яка технічно неможлива у відкритих зонах), або нарощування потужностей витяжних систем, що є економічно невиправданим. Нерозв'язаною частиною загальної проблеми залишається створення адаптивних систем, здатних динамічно реагувати на пікові викиди без надмірних енерговитрат. Перспективним вектором досліджень, що наразі лише набуває розвитку, є комбінування механічних бар'єрів (Flap-систем) та аеродинамічних завіс, які реалізують принцип "стримування" замість "видалення". Саме обґрунтуванню ефективності та параметрів таких комбінованих систем присвячується дана стаття.

Метою цієї роботи є систематизація знань про природу розподілених джерел пилу та обґрунтування переходу до комбінованих методів захисту, що поєднують механічну герметизацію (Flap-системи), аеродинамічне екранування (повітряні завіси) та локальну рециркуляцію (інтегральна фільтрація).

Для розробки ефективних систем знепилення необхідно глибоко розуміти механізми, що призводять до переходу твердих частинок у зважений стан. На відміну від точкових джерел, де пил утворюється внаслідок механічного руйнування, у розподілених джерелах домінує механізм індукції повітря.

При гравітаційному переміщенні (падінні) зерна відбувається передача імпульсу від твердих частинок до навколишнього газу. Цей процес можна описати як роботу своєрідного "поршня" або ежектора. Коли масив зерна падає, він прискорюється під дією сили тяжіння (g). Внаслідок сил в'язкого тертя прикордонний шар повітря навколо кожної частинки та навколо всього потоку залучається до руху. Дослідження [2,3] показують, що потік матеріалу спочатку звужується, а потім розширюється, формуючи турбулентний шлейф. Для розрахунку об'єму повітря, що захоплюється, використовують наступну формулу:

$$Q_{ind} = \frac{0,66 \, g \, m \, (hA)^{2/3}}{d_p \rho_p} \quad (1)$$

де Q_{ind} — об'єм повітря, що захоплюється;

h — висота падіння, м

m — маса сипучого матеріалу;

d_p — діаметр частинок;

g — прискорення вільного падіння;

ρ_p — густина, кг / м³;

A — площа поперечного перерізу.

У момент досягнення матеріалом приймальної поверхні (дна бункера, стрічки конвеєра) його швидкість різко падає до нуля. Кінетична енергія потоку трансформується, створюючи зону надлишкового статичного тиску в місці контакту.

Стиснене повітря, насичене дрібнодисперсними частинками (пилом), не може проникнути крізь щільний насип зерна і шукає шляхи найменшого опору. Воно виринає назовні у вигляді радіальних струменів, долаючи опір нещільностей укриття. Саме цей вторинний потік, що несе пил, є головним об'єктом боротьби.

Важливою кількісною характеристикою процесу є коефіцієнт специфічного захоплення повітря SE [1], що визначається за наступною формулою:

$$SE = (Q_{exhaust} + Q_{leak} - Q_{grain}) / Q_{grain} \quad (2)$$

де $Q_{exhaust}$ — середня об'ємна витрата повітря з повітропроводів, м³ / хв;

Q_{leak} — розрахункова швидкість витіку повітря, $\text{м}^3 / \text{хв}$;

Q_{grain} — дорівнює загальній об'ємній витраті зерна, яка була розрахована як об'єм кукурудзи, V , за час розвантаження, t .

Згідно з даними [12], для ліній приймання зерна важливою є герметизація, яка прагне звести параметр негерметичності H до нуля. У повністю відкритих системах SE може досягати значних величин. Наприклад, при розвантаженні перших 5 тонн зерна за 10 секунд об'єм витісненого пилоповітряного потоку становить близько $2560 \text{ м}^3/\text{год}$. Це створює миттєвий "вибух" пилу, який неможливо ефективно вловити стаціонарною аспірацією, розрахованою на середні навантаження.

Зерновий пил містить як органічні (крохмаль, оболонка), так і неорганічні (грунт, кремнезем) домішки. Частинки розміром менше 10 мкм (PM_{10}) здатні тривалий час перебувати у зваженому стані, дрейфуючи під дією навіть слабких конвективних потоків. Швидкість витання таких частинок становить менше 0.1 м/с , тоді як швидкість індукованих потоків при вивантаженні може досягати $5-10 \text{ м/с}$, що гарантує їх винесення за межі технологічної зони без належного контролю.

Розподілені джерела на зернових терміналах мають специфічні особливості, що відрізняють їх від точкових джерел у виробничих цехах.

Автомобільний прийом є одним з найбільш інтенсивних та складних для контролю джерел.

Основні характеристики:

— Характер процесу: Циклічний, залповий. За короткий проміжок часу відбувається скидання великої маси ($20-60$ тонн);

— Заднє вивантаження: кузов піднімається, створюючи значний перепад висот і відкриту поверхню дзеркала випаровування пилу. Потік зерна формує потужну ежекційну хвилю, спрямовану від ями вгору та в боки;

— Донне вивантаження: відбувається висипання через люки в дні. Хоча висота падіння менша, площа відкритих решіток, крізь які витісняється повітря, залишається великою;

— Рівень емісії: при низьких витратах зерна пилоутворення може сягати 14.6 г/т , знижуючись до 8.3 г/т при формуванні суцільного потоку [1]. Однак початкова фаза (відкриття бортів) завжди супроводжується піковим викидом;

— Проблема: основною проблемою є неможливість повної герметизації через габарити транспорту та необхідність вільного доступу.

Розвантаження вагонів-хоперів у підрейкові бункери є менш інтенсивним, але більш тривалим процесом.

Основні характеристики:

— Лінійність джерела — зона пиловиділення розтягнута вздовж колії. При одночасному розвантаженні маршруту джерело стає розподіленим на десятки метрів;

— Тунельний ефект — залізничні прийомні пункти часто розташовані в напіввідкритих галереях. Вітер, проходячи крізь таку галерею, посилює винесення пилу, зриваючи його з поверхні потоку;

— Аеродинамічний конфлікт — повітря, витіснене з підземного бункера, прагне вийти вгору через ту ж решітку, крізь яку сиплеться зерно. Це створює протитечію, де пил активно виноситься назустріч гравітаційному потоку зерна.

Грейферне розвантаження суден являється найбільш критичним джерелом з точки зору екологічного впливу на портові міста [5]. Основні характеристики:

— Масштаб: грейфери об'ємом $10-40 \text{ м}^3$ скидають масу вантажу з висоти в приймальний бункер;

— Механіка викиду: момент розкриття грейфера генерує масивний ударний імпульс. Об'єм витісненого з бункера повітря дорівнює об'єму скинутого вантажу плюс об'єм захопленого повітря. Без спеціальних заходів це призводить до утворення "грибоподібної" хмари пилу, що піднімається на висоту десятків метрів;

— Вплив вітру: робота ведеться на відкритих причалах, де швидкість вітру часто перевищує $5-10 \text{ м/с}$, що робить традиційні парасолі неефективними.

Таблиця 1 – Класифікація розподілених джерел

Тип джерела	Характер емісії	Основний драйвер пилу	Ключова проблема контролю
Автомобільний	Залповий, інтенсивний	Витіснення повітря з ями	Габарити транспорту, відкритість
Залізничний	Лінійний, тривалий	Протитечія повітря крізь решітки	Протяжні зони, вітрове знесення
Грейферний	Циклічний, вибухоподібний	Ударна хвиля при розкритті	Величезні об'єми повітря, вітер

Існуючі технології та методи знепилення можна розділити на пасивні (герметизація), активні (аспірація, завіси) та комбіновані.

Герметизація являє собою метод фізичної ізоляції джерела пилоутворення з теоретичним прагненням до абсолютної герметичності системи ($H=0$). На практиці цей підхід реалізується шляхом ретельного ущільнення стиків, встановлення захисних кришок на конвеєрах та використання гнучких з'єднань. Однак ефективність методу обмежується неможливістю повної ізоляції зон завантаження та розвантаження через наявність необхідних технологічних отворів для проходження зерна. Крім того, герметизація без системи відведення надлишкового тиску створює зворотний ефект: запилене повітря виривається крізь мікрощілини з високою швидкістю, що призводить до збільшення радіусу розсіювання пилу.

Однак найпоширенішим методом боротьби з пилом залишається традиційна аспірація, принцип дії якої базується на створенні локального розрідження за допомогою витяжних зонтів. Розрахунок необхідної витрати повітря зазвичай виконується за емпіричними формулами, наприклад, рівнянням Далла Валле [1]. Головним недоліком методу є його висока енергоємність: для ефективного транспортування пилу повітропроводами необхідно підтримувати швидкість потоку в межах 15–23 м/с, що створює значний аеродинамічний опір. На застарілих терміналах питомі витрати енергії можуть сягати 1,5–2,0 кВт·год/т, що є економічно неефективним за сучасними стандартами. Окрім того, ефективність всмоктування падає квадратично при віддаленні джерела пилу від зонта, а інерційність системи не дозволяє впоратися з піковими викидами при залповому скиданні вантажу. Додатковою проблемою є значні тепловтрати взимку через викид нагрітого повітря в атмосферу.

Флар-системи є механічними пристроями односторонньої дії, що монтуються безпосередньо на решітках приймальних бункерів. Конструктивно вони складаються з еластичних пелюсток (гумових або поліуретанових), які відкриваються під вагою зернового потоку і автоматично закриваються після його проходження. Функціонуючи як зворотний клапан, система фізично блокує вихід витісненого повітря назовні, змушуючи пил осідати всередині бункера або видалятися через допоміжну систему аспірації малої потужності. Використання таких клапанів дозволяє знизити необхідний об'єм аспірації на 30–50%, оскільки системі достатньо лише підтримувати незначне розрідження, а не компенсувати повний об'єм витісненого повітря.

Повітряні завіси представляють собою метод аеродинамічної ізоляції, адаптований з гірничої промисловості та будівельних технологій, принцип якого полягає у створенні плоского високошвидкісного струменя повітря, що діє як невидимий бар'єр. Для роботи із зерновими культурами оптимальна швидкість потоку в завісі становить 10–12 м/с; перевищення цього показника, характерне для шахтних систем, є небажаним через ризик видування легкої фракції зерна. Ця технологія є найбільш ефективною для перекриття великогабаритних отворів, таких як в'їзні ворота або верхня частина бункера грейфера, де використання фізичних перешкод є неможливим. Завдяки локалізації повітряного потоку без необхідності його транспортування на великі відстані, рециркуляційні завіси демонструють значно вищу енергоефективність порівняно з витяжними системами, забезпечуючи ефективність утримання пилу на рівні 95–98% при коректному налаштуванні аеродинамічного балансу.

Функціонування аспіраційних установок неминуче пов'язане зі складними аеродинамічними процесами, які при застарілих підходах до проектування призводять до значних ресурсних втрат. Баланс між необхідною потужністю всмоктування та економічною доцільністю часто порушується, перетворюючи систему очищення повітря на основне джерело непродуктивних витрат підприємства. В результаті традиційні системи страждають від низки системних вад:

- Транспорт "баласту": Системи переміщують величезні об'єми чистого повітря (до 95–99% потоку) заради вловлювання малої кількості пилу. Це пряма втрата енергії на роботу вентиляторів;
- Втрати продукту: Висока швидкість всмоктування (понад 2.5 м/с) біля джерела часто захоплює кондиційне зерно, що вимагає додаткових систем сепарації та повернення продукту в потік;
- Залежність від людського фактора: Ефективність рукавних фільтрів та циклонів залежить від регулярності обслуговування. Забиті фільтри різко знижують продуктивність, тоді як прориви рукавів призводять до вторинного забруднення.

Питомі витрати енергії на аспірацію є одним із ключових індикаторів технічної досконалості терміналу, що суттєво впливає на загальну рентабельність перевалки. Глибокий аудит енергетичних профілів різного типу обладнання виявляє значний технологічний розрив між конвенційними методами та інноваційними підходами до пилопригнічення. Порівняльний аналіз показує драматичну різницю в енергоспоживанні:

- Традиційні системи: Споживають 1.5–2.2 кВт·год на тонну переваленого зерна.
- Сучасні оптимізовані системи: Споживають 0.25–0.36 кВт·год/т (на прикладі мобільних комплексів та *Eco-hoppers* [11]).
- Теплові втрати: Врахування необхідності нагріву заміщувального повітря може збільшити експлуатаційні витрати традиційних систем на 30–40% у зимовий період. Повітряні завіси зменшують інфільтрацію зовнішнього повітря на 80%, значно знижуючи теплове навантаження.

На основі проведеного аналізу та вивчення передового світового досвіду (зокрема технологій *Eco-Hopper* та *Flex-Flap*) [5,8,9,10,11], найбільш перспективним вбачається підхід, що інтегрує сильні сторони різних методів у єдину систему. Суть запропонованої концепції полягає у створенні частково замкнутого циклу пилопригнічення, який реалізується через послідовну трирівневу систему захисту.

Перший рівень: Механічне стримування Базовим етапом є встановлення системи гнучких клапанів (*Flex-Flap*) на приймальному бункері. Це дозволяє перекрити основний переріз отвору, залишаючи відкритим лише шлях для безпосереднього проходження зерна. Таке рішення нейтралізує основний об'єм ежекційного повітря, змушуючи його залишатися всередині бункера, та гасить первинний енергетичний імпульс викиду.

Другий рівень: Аеродинамічне блокування зони, які неможливо перекрити механічним шляхом (простір над клапанами, зона проходження грейфера), захищаються за допомогою повітряних завіс. Завіса створює динамічний тиск, що перевищує тиск витісненого повітря, ефективно «замикаючи» пил усередині конструкції. При цьому використовується принцип Push-Pull (нагнітання-всмоктування), де одна сторона формує повітряний струмінь, а протилежна — його вловлює.

Третій рівень: Інтегральна фільтрація Завершальним елементом системи є відмова від громіздких централізованих аспіраційних мереж на користь локальних фільтрувальних модулів, вбудованих безпосередньо в корпус бункера або укриття. Цей підхід забезпечує рециркуляцію повітря: після очищення воно не викидається в атмосферу, а повертається в технологічний процес (наприклад, живить повітряну завісу) або в приміщення, що дозволяє зберігати тепло. Крім того, пил автоматично струшується імпульсами стисненого повітря назад у потік зерна, що усуває необхідність у шлюзових живильниках та окремих системах утилізації пилу.

Впровадження комбінованого методу створює виражений адитивний ефект, де кожен рівень доповнює інші: механічні клапани гасять основну енергію викиду, повітряні завіси вловлюють залишкові прориви, а інтегральні фільтри підтримують легке розрідження, необхідне для запобігання витокам через мікрощілини.

З економічної точки зору, такий підхід дозволяє суттєво знизити капітальні витрати, оскільки відсутність кілометрів повітропроводів, циклонів та потужних промислових вентиляторів компенсує вартість високотехнологічних бункерів. Додатковою перевагою є висока технологічна гнучкість, що робить цей метод ідеальним для мобільних установок (наприклад, мобільних хоперів у портах), де підключення до стаціонарних аспіраційних мереж є технічно неможливим.

Аналіз проблеми розподілених джерел пиловиділення свідчить про вичерпання потенціалу традиційних аспіраційних систем. Фізика ежекційних процесів при перевантаженні зерна вимагає переходу від стратегії "видалення повітря" до стратегії "стримування та локалізації".

Комбінований метод, що інтегрує механічні бар'єри (*Flap*), аеродинамічні завіси та локальну інтегральну фільтрацію, є безальтернативним вектором розвитку галузі. Цей підхід дозволяє:

- Досягти ефективності знепилення $> 95\%$ навіть для таких складних джерел, як грейферне вивантаження;
- Знизити енергоємність процесу в 3-5 разів (до рівня < 0.3 кВт·год/т) шляхом усунення транспортування баластного повітря та теплових втрат [7];
- Забезпечити екологічну безпеку та збереження якості продукту шляхом повернення пилу в потік.

Впровадження таких систем, хоч і вимагає інженерного переосмислення вузлів перевантаження, є економічно виправданим завдяки радикальному зниженню операційних витрат та підвищенню надійності обладнання.

ANALYSIS OF DISTRIBUTED DUST EMISSION SOURCES IN GRAIN TERMINALS: FROM THE PHYSICS OF EJECTION TO ENERGY-EFFICIENT COMBINED DUST SUPPRESSION METHODS

O.I. Haponiuk, DSc, Professor, V.M. Tkachenko, PhD Candidate,
Odesa National Technological University, Odesa, Ukraine

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of the modernization challenges facing dust control systems at contemporary grain terminals, where the exponential growth in cargo throughput intensity increasingly conflicts with stringent environmental regulations and energy efficiency imperatives. The authors compellingly argue that the traditional engineering paradigm, reliant on high-energy aspiration networks for the "elimination of consequences" of dust generation, has exhausted its technical and economic viability. Based on a profound investigation into the physics of aerodynamic processes, specifically ejection effects and the "piston" action of gravitational grain streams, the fundamental inadequacy of classical calculation models (such as the Dalla Valle

equation) to effectively compensate for burst dynamic dust emissions during heavy-duty truck unloading and grab transshipment is substantiated.

The key scientific contribution of this work is the systematization of knowledge regarding the nature of distributed dust sources and the justification for a strategic shift towards "containment and localization." The mechanics of transforming the falling flow's kinetic energy into a zone of excess static pressure, which generates high-velocity radial jets of contaminated air, are analyzed in detail. For the first time in domestic practice, a concept of a three-level combined protection system is proposed and detailed, integrating: 1) mechanical sealing using adaptive valve systems (Flex-Flap); 2) aerodynamic shielding via controlled air curtains; 3) local air recirculation through integral filtration modules. Research results demonstrate that implementing the proposed approach allows for the reduction of peak dust emissions by 95–98% and decreases specific energy consumption from 1.5–2.0 kWh/t to 0.25–0.30 kWh/t by eliminating the transport of "ballast" air. The article offers practical engineering solutions for creating environmentally safe systems adaptive to dynamic loads.

Key words: grain terminal, dust suppression, aspiration, ejection, air curtain, integral filtration, energy efficiency, distributed dust sources, combined aspiration system.

Література

1. Billate R., Maghirang R., Casada M. Measurement of Air Entrainment and Dust Emission during Shelled Corn Receiving Operations with Simulated Hopper Bottom Grain Trailers. 2002 ASABE Annual Meeting; presentation paper. St. Joseph, Mich.: ASABE, 2002. Paper No. 026112. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.9776>.
2. Cooper P., Arnold P. C. Air entrainment and dust generation from a falling stream of bulk material. KONA Powder and Particle Journal. 1995. Vol. 13. P. 125–134. DOI: <https://doi.org/10.14356/kona.1995017>.
3. Ogata K., Funatsu K., Tomita Y. Experimental investigation of a free falling powder jet and the air entrainment. Powder Technology. 2001. Vol. 115, no. 1. P. 90–95. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(00\)00329-6](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(00)00329-6).
4. Ansart R., Letourneau J.-J., de Ryck A. [et al.] Dust emission by powder handling: Influence of the hopper outlet on the dust plume. Powder Technology. 2011. Vol. 212, no. 3. P. 418–424. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.06.022>.
5. Zhang H., Meng W. Study on Dust Suppression of Air Curtain Soft-Sealing System of Grab Ship Unloader. Processes. 2022. Vol. 10, no. 8. Article 1505. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10081505>.
6. Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design / ACGIH. 30th ed. Cincinnati : American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2019. 275 p.
7. Bazaluk O., Postnikova M., Halko S. [et al.] Energy Saving in Electromechanical Grain Cleaning Systems. Applied Sciences. 2022. Vol. 12, no. 3. Article 1418. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12031418>.
8. Nie W., Zhang X., Peng H. [et al.] Research on air curtain dust control technology for environmental protection at fully mechanized working faces. Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29, no. 28. P. 43371–43384. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18775-1>.
9. Wypych P. W., Cook C. Dust Control in Bulk Handling Systems. International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2012. Vol. 26, Iss. 3. P. 236–243. DOI: 10.1080/17480930.2011.595085.
10. De Regt Conveyor Systems. Eco Hopper: Efficient Unloading System with Dust Control. Dry Cargo International. 2025. June. P. 104.
11. SAMSON Materials Handling. Eco Hopper for smallest environmental impact during ship unloading: Technical Review. Bulk Solids Handling. 2022. URL: <https://www.samson-mh.com>
12. Напрями зменшення енергомосткості систем знепилення пристроїв розвантаження зерна / В.М. Ткаченко, О.І. Гапонюк // 36. тез доповідей 85 наукової конференції викладачів університету, Одеса: ОНТУ, 2025. – С. 225–227.

Отримано в редакцію 12.11.2025
Прийнято до друку 28.11.2025
Розміщено в інтернеті 29.12.2025

Received 12.11.2025
Approved 28.11.2025
Available in Internet 29.12.2025