

А.Л. Скоромний

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ СУМАРНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ РУКАВНИХ ФІЛЬТРІВ З ІМПУЛЬСНОЮ РЕГЕНЕРАЦІЄЮ НА СТАДІЯХ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Анотація. В роботі розглянуто енергоспоживання протягом життєвого циклу будівництва та експлуатації фільтрів рукавних з імпульсною регенерацією (ФРІР) для очищення димових газів від пилу. Зібрані, узагальнені та проаналізовані експериментальні дані ФРІР, що розроблені та реалізовані компанією ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України протягом останніх 30 років. Отримані залежності площі фільтрації, маси та витрати стисненого повітря від продуктивності фільтрів дозволили визначити реальне енергоспоживання, в тому числі енерговитрати на виготовлення металу і будівництво корпусу та механічного обладнання фільтрів, енерговитрати на створення фільтрувальних рукавів, витрати електроенергії на роботу вентилятора для транспортування димових газів через фільтр та витрати електроенергії на роботу компресора для компримування повітря, що використовується в системі регенерації.

Встановлено, що енергетичні витрати на експлуатацію протягом одного року є співмірними з енерговитратами на виробництво фільтраційної установки. Обидві величини демонструють близькі значення в абсолютних показниках, а також дуже подібний характер залежностей. Така відповідність дозволяє по-новому поглянути на структуру енергетичного навантаження фільтраційних систем упродовж життєвого циклу, а також виділити ті параметри, які мають суттєвий вплив на сумарну енергоємність.

Ключові слова: енергоємність, рукавні фільтри з імпульсною регенерацією, енерговитрати на будівництво, енерговитрати на експлуатацію, сумарні енерговитрати.

Постановка проблеми. Сучасні системи уловлення димових газів промислових установок і очищення цих газів від твердих суспендованих частинок пилу є невід'ємною частиною промислових процесів виробництва в гірничо-металургійному комплексі, цементній промисловості, підприємствах енергетичного сектору, систем аспірації тощо. При проектуванні таких систем основна увага інженерів лежить в області підвищення ефективності уловлення пилогазових викидів та забезпечення достатньої ефективності очищення для досягнення кінцевої запиленості димових газів після очистки на рівні сучасних екологічних нормативів (5-20 мг/м³ в залежності від токсичності пилу).

При цьому питання енергоспоживання є похідною відносно конструкції газоочисних установок і розглядається переважно в контексті наявних та доступних на промислових підприємствах електричних потужностей та інших енергоносіїв в достатній кількості та якості, які необхідні для забезпечення надійної та стабільної роботи систем газоуловлювання та газоочистки. Це є актуальним і для фільтрів рукавних з імпульсною регенерацією (ФРІР), які є одним з найбільш перспективних типів газоочисного устаткування, частка якого постійно збільшується. Відсутність систематизованого підходу до оцінки енергоемності газоочисних систем на основі ФРІР протягом усього життєвого циклу обмежує можливості для їхнього впровадження в стратегії сталого розвитку та декарбонізації промисловості.

Таким чином існує проблема комплексного дослідження енергетичних витрат на створення та експлуатацію систем очистки газів від пилу на базі ФРІР, що дозволить інтегрувати дані про конструкцію, експлуатацію та життєвий цикл у загальний екологічно-енергетичний баланс.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений огляд науково-технічної інформації показав, що основна увага дослідників та інженерів, які займаються удосконаленням систем газоочистки на базі рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією, спрямований на:

- оптимізації конструктивних параметрів – зміни геометричних розмірів фільтрувальних рукавів (їх довжини, діаметру, форми та їх взаємного розташування всередині корпусу фільтра) [1] [2–5];
- покращенні конструкції системи регенерації – зміни форми імпульсних сопел, їх розташування відносно входу у фільтрувальні рукави, куту подачі стисненого повітря, тощо [6];
- покращенні систем управління системами регенерації – подача імпульсів по досягненні порогових значень перепаду тиску в камерах чистого та забрудненого газу [7, 8];
- покращенні розподілу очищеного газу всередині фільтру – використання розподільників потоку та інших технічних рішень, спрямованих на зменшення гідравлічного опору фільтрів [9, 10];
- вибору марки сталі для виготовлення корпусу рукавного фільтру [11, 12];
- розроблення методів економічної оптимізації проектування рукавних фільтрів [11–13], в тому числі моделями мінімізації сумарних річних витрат на роботу рукавних фільтрів (Total Annual Cost, TAC);

Водночас варто підкреслити, що більшість робіт зосереджується на оптимізації експлуатаційної діяльності фільтрів, але не зачіпають питання, пов'язані з попереднім етапом – зокрема, з технологіями виробництва корпусів та конструктивними особливостями, які також суттєво впливають на енергоефективність. Подібних досліджень, які комплексно аналізують вплив саме конструктивних рішень і технологій виготовлення фільтрів на їхню подальшу експлуатацію, наразі дуже мало. Це підкреслює важливість

подальших робіт, що можуть доповнити подібні економічні моделі аналізом повного життєвого циклу та конструктивних характеристик рукавних фільтрів.

Мета дослідження. Метою даної роботи є дослідження факторів, що впливають на енергоємність виробництва та експлуатації рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією для пошуку шляхів зменшення сумарних витрат енергії протягом життєвого циклу створення та експлуатації газоочистного устаткування.

Викладення основного матеріалу дослідження.

Одним із ключових факторів, що впливають на загальну енергоємність систем уловлювання й очищення газів, є маса металоконструкцій фільтра рукавного з імпульсною регенерацією (ФРІР), яка безпосередньо визначає матеріалоємність, габарити, витрати на транспортування та обслуговування, а також обсяг спожитої енергії на виготовлення та монтаж обладнання. Враховуючи це, оптимізація конструктивних параметрів ФРІР з метою зменшення його маси та площі фільтрації без втрати ефективності є актуальним напрямом підвищення ресурсної ефективності та зменшення вуглецевого сліду промислових підприємств.

У межах дослідження проаналізовано технічні характеристики 55 моделей фільтрів рукавних з імпульсною регенерацією, виготовлених і побудованих компанією ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України за останні 30 років. Ці фільтри охоплюють широкий діапазон продуктивностей – від 3,2 до 2723,0 тис. м³/год. Апроксимація експериментальних даних здійснювалась методом найменших квадратів. Для порівняльного аналізу було залучено вибірккові дані щодо фільтрів закордонного виробництва:

- AM Industrial Group, LLC;
- C&W DustTech;
- Controlled Air Design;
- DMC;
- Donaldson Company, Inc.;
- Sternvent;
- U.S. Air Filtration, Inc.

На Рис. 1 представлено графік залежності площі фільтрації від продуктивності рукавного фільтра, який демонструє майже лінійну кореляцію. Така поведінка відповідає теоретичному очікуванню за умови фіксованого значення питомого фільтраційного навантаження. Лінія тренду побудована за даними фільтрів виробництва ДП «УкрНТЦ «Енергосталь». Експериментальні дані фільтрів імпортного виробництва підтверджують виявлений тренд в частині фільтрів продуктивності до 400 тис. м³/год.

Як видно з Рис. 1, площа фільтрації з коефіцієнтом достовірності апроксимації експериментальних даних, який наближається до одиниці, визначається залежністю:

$$F = 10,867 \cdot Q \quad (1)$$

де:

F – площа фільтрації, м²;

Q – продуктивність фільтру по очищуваному газу, 1000 м³/год.

На Рис. 2 представлені дані, які свідчать про те, що маса фільтрів ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» має ступеневу сублінійну залежність від продуктивності фільтрів по очищуваному газу і ця маса фільтру визначається формулою:

$$M_{\phi} = 0,796 \cdot Q^{0,92} \quad (2)$$

де:

M_{ϕ} – маса фільтру, т.

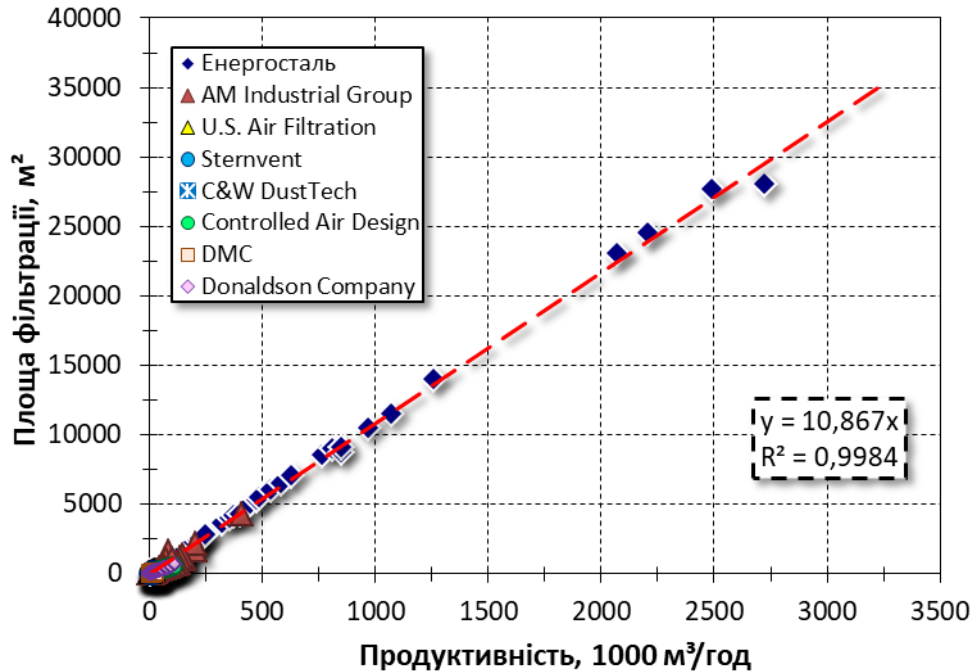


Рисунок 1 – Залежність площі фільтрації від продуктивності рукавного фільтра

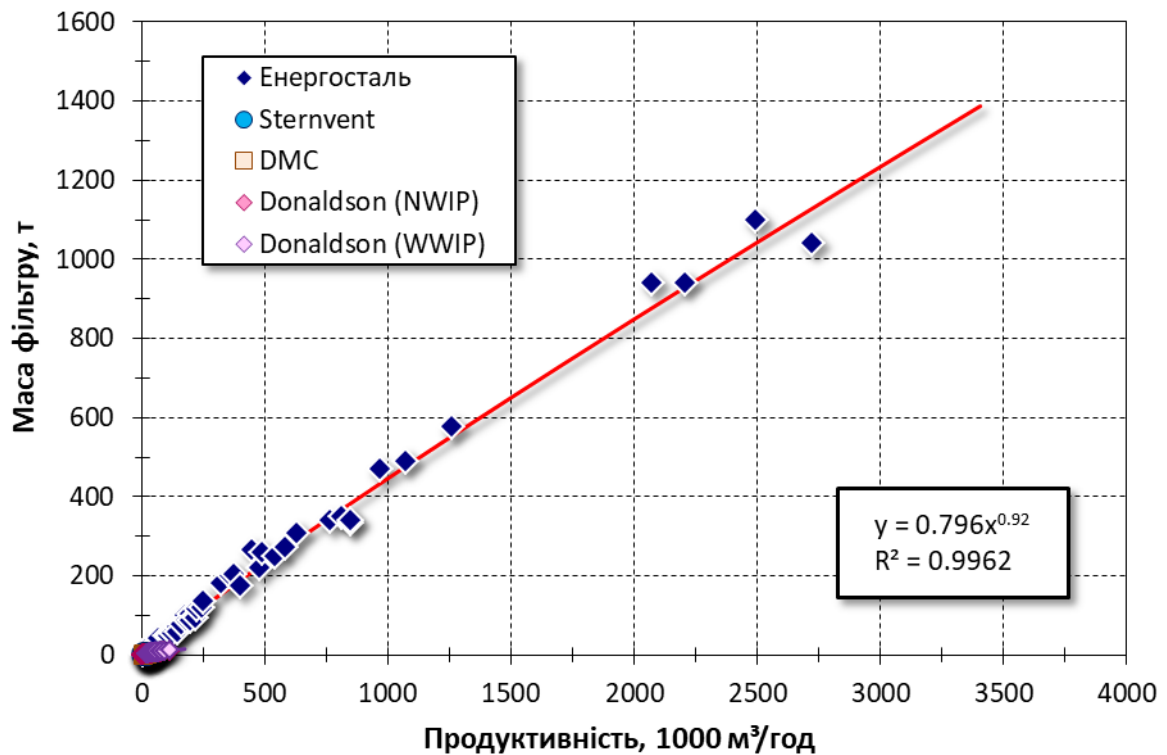


Рисунок 2 – Залежність маси металоконструкцій від продуктивності фільтра

Різні типи технологічних операцій оброблення металу (наприклад, свердління та розкрій лазером) суттєво відрізняються за питомими енергетичними витратами [14], що на пряму впливає на величину вуглецевого сліду виробництва. Це означає, що використання однакових матеріалів не гарантує однакової енергоємності – вона змінюється в залежності від способу їх оброблення, обладнання та організації виробничого процесу.

Фільтрувальні рукави можуть виготовлятися з різних видів волокон – як синтетичних (полієфір, поліпропілен, фторопласт, поліамід), так і неорганічних (скловолокно, базальтове волокно), із використанням тканих або нетканих структур. Тип волокна, спосіб плетіння та наявність додаткових покриттів (мембран, термостійких просочень тощо) безпосередньо впливають на механічну міцність, термостійкість, хімічну стійкість і фільтраційну здатність рукава. Ці параметри визначають рекомендовану температуру експлуатації, ефективність очищення та, що особливо важливо для екологічного аналізу, – середній строк служби елемента до заміни.

Для збереження узагальненого характеру оцінки та забезпечення її застосовності до ширшого кола об'єктів у межах дослідження було впроваджено низку спрощень:

- По-перше, передбачається, що всі металеві компоненти корпусу, опорних конструкцій і внутрішніх елементів фільтра виготовляються із вуглецевої сталі, без урахування технологічної обробки конкретних деталей.

- По-друге, вважається, що всі фільтрувальні рукави виготовлені з полієфірного (ПЕ) матеріалу первинного походження. У межах спрощеної методики фільтрувальний матеріал прийнято як однорідний полієфірний нетканий текстиль із питомою масою 500 г/м².

- По-третє, для врахування енергетичних витрат на оброблення, складання та інші етапи виробництва встановлено фіксований коефіцієнт корекції, що дорівнює 30 % додаткових енерговитрат до питомої енергоємності відповідних базових матеріалів – сталі для корпусу та полімерного полотна для фільтрувальних елементів.

Ці спрощення не відображають індивідуальну картину для кожного виробника, але дозволяють забезпечити сталу методологічну основу для оцінки енергетичних характеристик фільтраційних установок у різних масштабах, що є критично важливим при сценарному аналізі та прогнозуванні впливу на довкілля.

З урахуванням прийнятих спрощень вхідні дані для оцінки енерговитрат на виробництво основних елементів фільтраційної системи наведено в табл.1. Питома енергоємність виробництва вуглецевої сталі прийнята на рівні 41,02 МДж/кг, а для первинної пластмаси, яка слугує сировиною для виробництва фільтрувальних рукавів, – 112,2 МДж/кг [15]. Для обох матеріалів застосовано поправку +30 % на обробку, складання та допоміжні технології, внаслідок чого узагальнені питомі витрати становлять відповідно 53,33 МДж/кг для сталі та 145,86 МДж/кг для синтетичного волокна. Поверхнева щільність фільтрувального матеріалу прийнята рівною 0,5 кг/м², що відповідає типовим параметрам полієфірних рукавів середньої щільності.

Після виробництва фільтраційної установки ключовим етапом життєвого циклу стає експлуатація, яка супроводжується безперервним споживанням енергії. Для рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією основними джерелами енергетичних витрат є:

- робота вентилятора, який забезпечує рух забрудненого газу через фільтрувальні рукава;
- робота компресора, що створює імпульси стисненого повітря для очищення рукавів.

Таблиця 1

Вхідні дані для оцінки енерговитрат на виробництво елементів фільтра

Параметр	Базове значення	Корекція на виробництво	Узагальнене значення
Питома енергоємність виробництва прокатної сталі, $SE_{ст}$, МДж/кг	41,02	+30 %	53,33
Питома енергоємність виробництва первинного полімеру, $SE_{ПЕ}$, МДж/кг	112,2	+30 %	145,86
Поверхнева щільність фільтрувального матеріалу, $\rho_{ПЕ}$, кг/м ²	0,50	–	–

Ці два компоненти формують експлуатаційну енергоємність системи, яку необхідно враховувати при аналізі повного енергетичного навантаження.

Робота вентилятора забезпечує подолання гідравлічного опору системи фільтрації та транспортування очищеного газу до димаря або наступних технологічних ланок. Кількість спожитої енергії визначається виразом:

$$E_{вент} = \frac{\Delta P_{\phi} \cdot Q \cdot t}{\eta_{вент}}, \quad (3)$$

де:

$E_{вент}$ – енергія, необхідна для роботи вентилятора, Дж;

ΔP_{ϕ} – сумарний гідравлічний опір фільтра, Па;

Q – об'ємна продуктивність установки, м³/с;

t – тривалість експлуатації, с;

$\eta_{вент}$ – ККД вентилятора (у межах 65–75 %).

Значення ΔP оцінюється з урахуванням розрахункового опору фільтрувального матеріалу, залишкового шару пилу та опору корпусу. Таким чином, величина $E_{вент}$ пов'язана з конструкцією фільтра опосередковано, через втрати тиску та геометрію.

Імпульсна регенерація фільтрувальних рукавів виконується шляхом періодичної подачі стисненого повітря, яке створює зворотну деформаційну хвилю і сприяє відриву шару пилу. Енергія, необхідна для компримування повітря, залежить як від кількості циклів, так і від надлишкового тиску у ресивері.

Процес стиснення повітря в компресорі описується політропним законом:

$$p \cdot V^k = \text{const}, \quad (4)$$

де:

k – показник політропи, який для сухого повітря при наближенні до адіабатичного стискання становить, приблизно, 1,33 [16];

p – тиск, Па;

V – об’єм повітря, м³.

Повна робота, необхідна для стискання одиниці об’єму газу від атмосферного тиску p_1 до тиску в ресивері p_2 , визначається з першого начала термодинаміки та інтегрується за виразом:

$$W = \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \cdot \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (5)$$

де:

W – робота стиснення, Дж;

p_1 – атмосферний тиск, Па;

p_2 – тиск у ресивері, Па;

V_1 – об’єм повітря до стиснення, м³;

k – показник політропи.

У практичному застосуванні доцільніше оперувати перепадом тиску $\Delta P = p_2 - p_1$ та середньою витратою стисненого повітря $q_{\text{пов}}$, а також враховувати ККД компресора, у спрощеному вигляді для оцінки енергетичних витрат приймається така інженерна формула:

$$E_{\text{компр}} = \frac{\Delta P \cdot Q_a \cdot t}{k-1} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{компр}}}, \quad (6)$$

де:

$E_{\text{компр}}$ – енергія, необхідна для роботи компресора, Дж;

ΔP – надлишковий тиск у ресивері, Па;

Q_a – середня витрата стисненого повітря, м³/с;

t – тривалість роботи, с;

$\eta_{\text{компр}}$ – ККД компресора (зазвичай 0,8–0,85).

Це спрощення засноване на припущенні ідеальної газової поведінки повітря та політропного режиму стиснення. Воно широко використовується для інженерного оцінювання енерговитрат у компресійних установках, зокрема при розрахунку систем імпульсної регенерації.

Слід зазначити, що середня витрата стисненого повітря Q_a не є сталою величиною – вона безпосередньо залежить від конструктивних параметрів фільтра, зокрема від площі фільтрації, довжини рукавів, частоти регенерації та обраної схеми очищення. В рамках цього дослідження побудовано узагальнені залежності питомих витрат повітря від продуктивності, що дозволяє кількісно оцінити значення $q_{\text{пов}}$ без потреби у глибокому моделюванні режимів подачі. Ці результати представлені на Рис. 3.

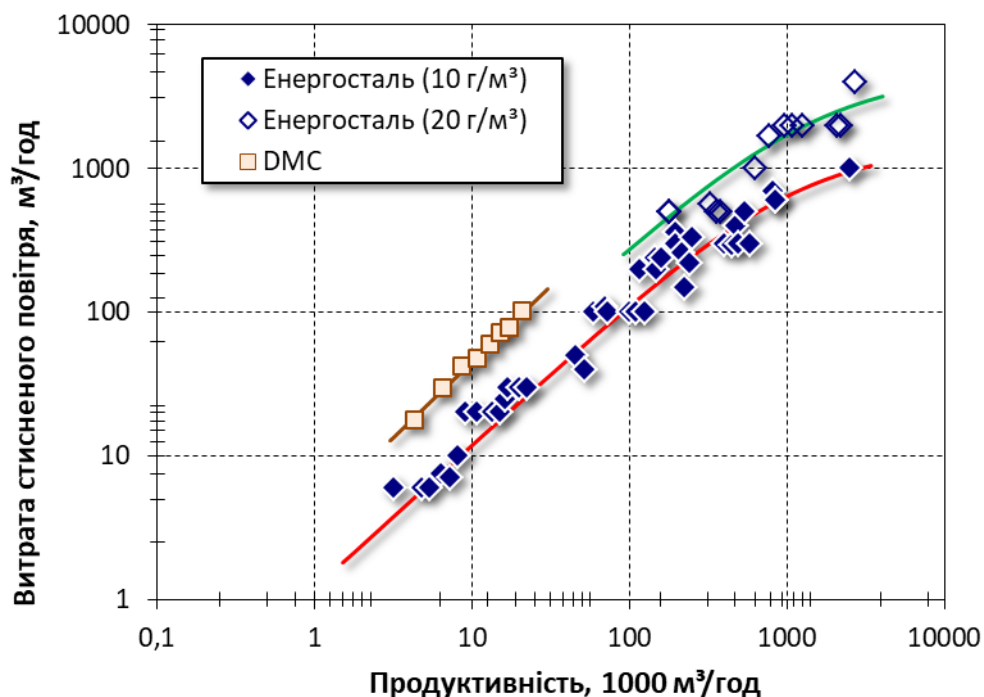


Рисунок 3 – Витрата стисненого повітря в залежності від продуктивності фільтра

На основі узагальнення та аналізу експериментальних даних виявлено закономірність витрат стисненого повітря: зі зростанням продуктивності питома витрата зменшується й добре описується функцією виду $Y = A \cdot X / (X + B)$:

$$\begin{cases} Q_a^* = 1445,45 \cdot \frac{1}{Q + 1194,145}; \text{ Запиленість до } 10 \text{ г/м}^3 \\ Q_a^* = 6337,48 \cdot \frac{1}{Q + 2832,152}; \text{ Запиленість до } 20 \text{ г/м}^3 \end{cases}, \quad (7)$$

де:

Q_a^* – питома витрата стисненого повітря, м³/тис.м³, яка обчислюється за виразом:

$$Q_a^* = \frac{Q_a}{Q}, \quad (8)$$

де:

Q_a – абсолютна витрата стисненого повітря, м³/год.

Загальна експлуатаційна енергоємність системи фільтрації визначається як сума обох компонентів:

$$E_{\text{експл}} = E_{\text{вент}} + E_{\text{комп}}, \quad (9)$$

Отримані залежності дозволяють оцінити вплив ключових параметрів – продуктивності, опору, ефективності обладнання – на експлуатаційні витрати енергії. Це, у свою чергу, дає змогу інтегрувати дані в загальну модель розрахунку життєвого енергетичного балансу фільтраційної системи.

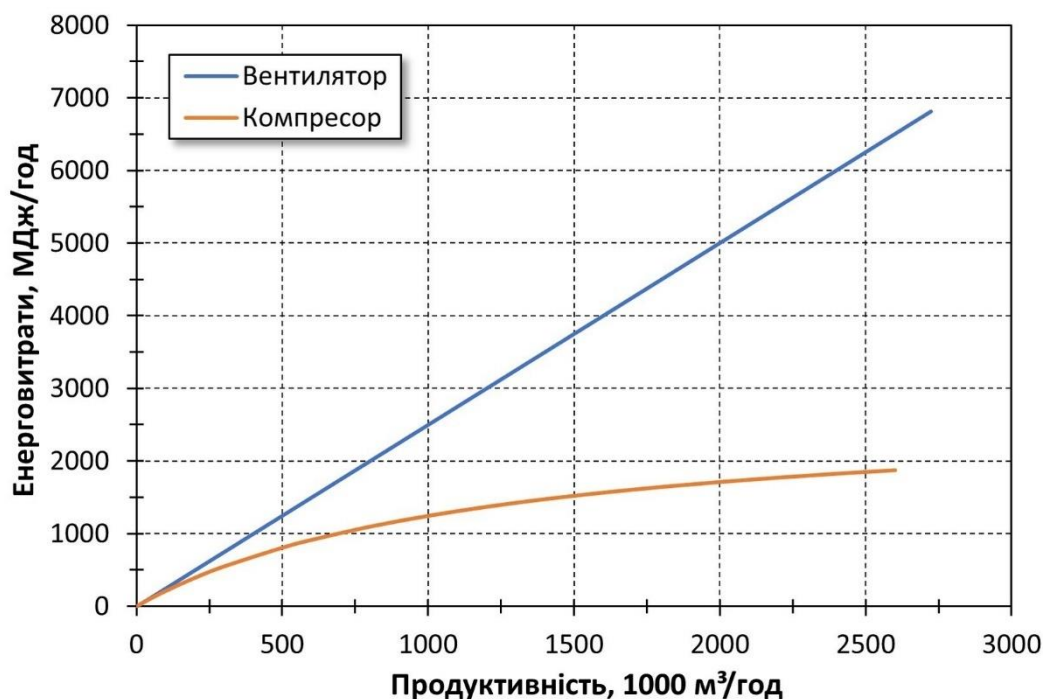


Рисунок 4 – Погодинні енерговитрати на роботу вентилятора та компресора стисненого повітря

Рис. 4 ілюструє питомі енерговитрати системи фільтрації в розрахунку на одну годину роботи, окремо для вентилятора, що забезпечує транспортування газу, та компресора, який створює імпульси стисненого повітря для регенерації фільтрувальних елементів. Обчислення проведено відповідно до формул (3) та (6).

З рисунка очевидно, що енергетичне навантаження, пов'язане з роботою вентилятора, суттєво перевищує витрати на компримування повітря. Така перевага зумовлена як значною продуктивністю основного газового потоку, так і сталим (лінійним) характером залежності втрат тиску від об'єму очищуваного газу.

Енерговитрати вентилятора зростають практично лінійно зі збільшенням продуктивності фільтра, що відповідає постійному гідравлічному опору та відносно стабільному ККД вентилятора. У той час витрати енергії на імпульсну регенерацію зростають за степеневим законом з показником меншим за одиницю, що відповідає характеру зміни витрат стисненого повітря.

На основі наведених вище формул і використовуючи технічні дані фільтраційних установок ДП «УкрНТЦ «Енергосталь», було виконано розрахунок експлуатаційної енергоемності для одного року безперервної роботи. Результати подано на Рис.5.

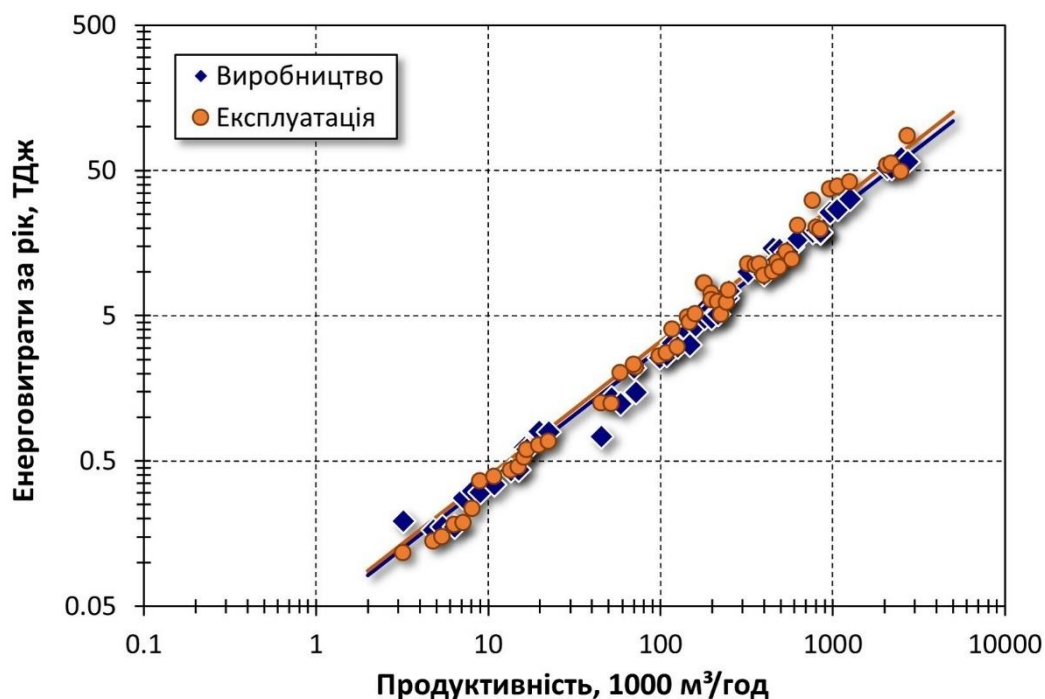


Рисунок 5 – Порівняння енерговитрат на виготовлення та річну експлуатацію фільтраційної установки

Один із ключових висновків, який випливає з аналізу рисунка, полягає в тому, що енергетичні витрати на експлуатацію протягом одного року є співмірними з енерговитратами на виробництво фільтраційної установки. Обидві величини демонструють близькі значення в абсолютних показниках, а також дуже подібний характер залежностей, що підтверджується збігом трендових кривих, наведених суцільними лініями. Така відповідність дозволяє по-новому поглянути на структуру енергетичного навантаження фільтраційних систем упродовж життєвого циклу, а також виділити ті параметри, які мають суттєвий вплив на сумарну.

Зокрема, вплив площі фільтрувального матеріалу є подвійним: з одного боку, більша площа збільшує масу текстильної частини й початкові енерговитрати на її виробництво. З іншого боку, збільшення площі тканини знижує частоту необхідної регенерації, зменшуючи навантаження на систему стиснення повітря та подовжуючи строк служби рукавів. Більша площа тканини забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження на фільтр, а отже, менше пилоутворення на одиницю поверхні, що позитивно впливає на довговічність матеріалу.

З огляду на те, що ресурс фільтрувальних елементів зазвичай перевищує один рік, зменшується частота їх заміни, а разом із нею – і середньорічні питомі витрати енергії на виробництво. У довгостроковій перспективі це дозволяє розглядати більшу площу тканини як енергетично вигідне рішення, навіть попри початкове зростання витрат на її виробництво.

Висновки. Таким чином, на основі узагальнення та аналізу експериментальних даних щодо конструктивних, масогабаритних та експлуатаційних параметрів виявлені закономірності впливу продуктивності на площу фільтрувальної поверхні і масу металу

для виготовлення рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією, а також на витрати стисненого повітря для роботи системи регенерації для очистки газів від пилу в широкому діапазоні продуктивності газоочисних установок 3,0-2700 тис. м³/год.

Ці залежності дозволили визначити енерговитрати на створення та експлуатацію ФРП, в тому числі енерговитрати на виготовлення металу і будівництво корпусу та механічного обладнання фільтрів, енерговитрати на створення фільтрувальних рукавів, витрати електроенергії на роботу вентилятора для транспортування димових газів через фільтр та витрати електроенергії на роботу компресора для компримування повітря, що використовується в системі регенерації.

Встановлено, що енергетичні витрати на експлуатацію протягом одного року є співмірними з енерговитратами на виробництво фільтраційної установки. Обидві величини демонструють близькі значення в абсолютних показниках, а також дуже подібний характер залежностей, що підтверджується збігом трендових кривих, наведених суцільними лініями. Така відповідність дозволяє по-новому поглянути на структуру енергетичного навантаження фільтраційних систем упродовж життєвого циклу, а також виділити ті параметри, які мають суттєвий вплив на сумарну енергоемність.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. J.-U. Kim, J. Hwang, H.-J. Choi, M.-H. Lee, Effective filtration area of a pleated filter bag in a pulse-jet bag house, *Powder Technol.* 311 (2017), pp. 522–527. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.013>.
2. J.R. Gabites, J. Abrahamson, J.A. Winchester, Design of baghouses for fines collection in milk powder plants, *Powder Technol.* 187 (2008), pp. 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.01.012>.
3. M.L. Croom, *Filter dust collectors: design and application*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1995, 253 P.
4. F. Löffler, H. Dietrich, W. Flatt, eds., *Dust collection with bag filters and envelope filters*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1988, 274 P. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-07900-2>.
5. [intensiv-filter.com/en/impressum/](https://www.intensiv-filter.com/en/impressum/), (n.d.). <https://www.intensiv-filter.com/en/impressum/> (accessed June 3, 2025).
6. Z. Yu, Y. Muraoka, K. Furumoto, T. Fukasawa, T. Ishigami, J. Liu, K. Fukui, A novel pulse-jet cleaning method to effectively extend the lifetime of pleated filter and reduce dust emission, *Adv. Powder Technol.* 35 (2024), pp. 104456. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.104456>.
7. N. Çankaya, M. Özcan, Performance optimization and improvement of dust laden air by dynamic control method for jet pulsed filters, *Adv. Powder Technol.* 30 (2019), pp. 1366–1377. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.04.014>.
8. A.V. Kuzmin, V.A. Pinchuk, S. Khudoliy, D.A. Garcia Arango, C.A. Echeverri Gutiérrez, M.S. Echeverri Gutiérrez, Feasibility of proportional–integral–derivative control for high-inertia heating systems: Energy use and dynamic response, *Appl. Therm. Eng.* (2025), pp. 126784. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126784>.

9. F. Zhang, Y. Ding, Z.-X. Low, L. Jia, G. Zhou, Y. Liu, Z. Zhong, W. Xing, Effects of flow distributor structures and particle-wall interaction on baghouse gas-solid flow, *Sep. Purif. Technol.* 335 (2024), pp. 126140. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126140>.
10. C.-J. Tsai, M.-L. Tsai, H.-C. Lu, Effect of filtration velocity and filtration pressure drop on the bag-cleaning performance of a pulse-jet baghouse, *Sep. Sci. Technol.* 35 (2000), pp. 211–226. <https://doi.org/10.1081/ss-100100152>.
11. A.L. Skoromnii, *Metodyka vibora ratsyonalnoho materyala korpusa rukavnoho fyltra s ympulsnoi reheneratsyei, v: Resursosberezhnye Y Enerhoeffektyvnost Ynzhenernoi Ynfrastrukturi Urbanyzyrovannikh Terrytoryi Y Promishlennikh Predpriyatiy Materyali II Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Ynternet-Konferentsyy, KhNUHKh ym. A. N. Beketova, Kharkov, 2016: ss. 11–15.*
12. A.L. Skoromnii, Ynhultsov S.V., *Kryteryi dlia vibora materyala korpusa rukav-noho fyltra typu FRYR, v: Sbornyk Trudov V Mezhdunarodnoi Nauchno-Praktycheskoi Konferentsyy Molodikh Uchenikh Y Spetsyalystov «Ynnovatsyonnie Puty Modernyzatsyy Bazovikh Otrasei Promishlennosti Enerho- Y Resursosberezhnye Okhrana Okruzhaiushchei Pryrodnoi Sredi», HP «UkrNTTs «Enerhostal», Kharkov, 2016: ss. 77–80.*A.C. Caputo, P.M. Pelagagge, Baghouse system design based on economic optimization, *Environ. Prog.* 19 (2000), pp. 238–245. <https://doi.org/10.1002/ep.670190410>.
13. H. Marczak, Energy inputs on the production of plastic products, *J. Ecol. Eng.* 23 (2022), pp. 146–156. <https://doi.org/10.12911/22998993/151815>.
14. S. Dutta, A. Mukhopadhyay, A.K. Choudhary, C.C. Reddy, Power consumption analysis of pulse jet filtration system assisted with pre-charger using polyester conductive media, *J. Inst. Eng. India Ser. E.* 102 (2021), pp. 17–23. <https://doi.org/10.1007/s40034-020-00179-w>.
15. P. Stavropoulos, V.C. Panagiotopoulou, Carbon footprint of manufacturing processes: conventional vs. non-conventional, *Processes.* 10 (2022), pp. 1858. <https://doi.org/10.3390/pr10091858>.

Received 24.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

***Regularities of formation of total energy expenditures of pulse-jet bag filters
at the stages of manufacturing and operation***

Abstract. The paper examines energy consumption throughout the lifecycle of construction and operation of pulse-jet regenerated bag filters (PJBF) for flue gas dedusting. Experimental data from PJBF developed and implemented by SE 'UkrSTC "Energostal" at Ukrainian mining-metallurgical enterprises over the past 30 years were collected, generalized, and analyzed. Obtained dependencies of filtration area, mass, and compressed air consumption on filter productivity enabled determination of actual energy consumption, including energy expenditures for metal production and construction of filter housing and mechanical equipment, energy for filter bags, electricity for fan operation to transport flue gases through the filter, and electricity for compressor operation for air compression in the regeneration system.

It was established that annual operational energy expenditures are comparable to energy costs for filter unit production. Both values show similar absolute figures and dependency

patterns. This equivalence offers a new perspective on the energy load structure of filtration systems over their lifecycle and highlights parameters significantly affecting total energy intensity.

Keywords: energy intensity, pulse-jet bag filters, construction energy expenditures, operational energy expenditures, total energy expenditures.

Скоромний Андрій Леонідович – к.т.н., старший науковий співробітник кафедри теплового інжинірингу та енергетичних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-9070>

Skoromnyi Andrii Leonidovich - PhD, senior researcher of Department of Thermal Engineering And Energy Technology of the Dnipro University of Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-9070>