

УДК 663.18

ст. наук. співр., к.т.н. **Анатолій Макаров**,

makarov.anatoly@kmbp.com.ua, ORCID: 0000-0002-7338-2906,

ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод», м. Калинівка, Україна

к.т.н., доц. **Михайло Сенчук**,

smp_21@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8968-7336,

Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

голова наглядової ради **Андрій Ходос**,

khodos@kmbp.com.ua, ORCID: 0009-0000-2198-2208,

заступник директора **Михайло Кирієнко**,

mihail_kirienko@ukr.net, ORCID: 0009-0008-5396-8644,

ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод», м. Калинівка, Україна

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.94-121>

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУКАВНИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ РОЗПИЛЮВАЛЬНИХ СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК

***Анотація.** Проаналізовано сучасний стан експлуатації обладнання для концентрування та сушіння молочних продуктів, дослідження та методики розрахунку процесів очищення відпрацьованого в установках розпилювального сушіння теплоносія-повітря, запиленого молочним порошком, в рукавних тканинних фільтрах, зокрема процесів фільтрування та імпульсного регенерування. Відмічено, що відомі дослідження рукавних фільтрів не містять достатньої інформації для обґрунтування конструкції фільтра для очищення повітря від молочного порошку із забезпеченням сучасних екологічних вимог. З урахуванням отриманих даних експериментальних досліджень процесів фільтрування на лабораторних моделях та повнорозмірних стендах, проведених на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» (м. Калинівка, Вінницька обл.), розглянуто напрями підвищення ефективності та надійності застосування рукавних фільтрів для розпилювальних сушильних установок. Запропоновано методики розрахунку аеродинамічного опору фільтрувального полотна – чистого і запиленого – та визначення рівноважного опору рукавного фільтра в процесі імпульсного регенерування, що враховує навантаження за швидкістю фільтрування, запиленістю, фракційним складом, тиском стисненого повітря та частотою імпульсів. Виконано порівняльний розрахунковий аналіз аеродинамічного опору при застосуванні рукавних фільтрів за одноступеневою схемою очищення (безпосередньо за сушильною камерою) та як другий ступінь очищення (після циклонів). Виявлено, що в діапазоні їхньої ефективної роботи аеродинамічний опір в обох випадках*

практично однаковий при суттєвому зменшенні питомого запилення дрібнодисперсним порошком відпрацьованого повітря, що дозволяє забезпечити сучасні екологічні показники щодо шкідливих викидів. Ефективність реалізованих технічних рішень у промислових зразках рукавних фільтрів підтверджено результатами пуско-налагоджувальних випробувань промислових зразків та під час їхньої подальшої експлуатації. На підставі набутого науково-технічного досвіду на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» (м. Калинівка, Вінницька обл.) розроблено, виготовлено й уведено в експлуатацію дев'ять комплектів рукавних фільтрів для сушильних установок продуктивністю від 500 до 2500 кг/год випаруваної вологи.

***Ключові слова:** рукавний фільтр, сухі молочні продукти, очищення повітря, молочний порошок, фільтрування, імпульсне регенерування.*

Вступ. Прогресивний розвиток молочно-консервної промисловості України тісно пов'язаний з модернізацією технологічних процесів шляхом оснащення виробництва новітнім ефективним обладнанням, зокрема й вітчизняними зразками, створеними та впровадженими українськими виробниками [1, 2]. Одним із напрямків подальшого підвищення енергетичної та екологічної ефективності процесу виробництва молочних продуктів є зменшення питомої витрати сировини на одиницю продукції та зниження негативного впливу шкідливих викидів дрібнодисперсного молочного пилу після сушильних установок. Отримання позитивного результату можна досягти шляхом більш глибокого очищення від молочного пилу відпрацьованого теплоносія-повітря після розпилювальних сушильних установок.

Виробництво сухих молочних продуктів починалося в 30-х роках минулого століття з застосуванням розпилювального сушіння й очищення повітря рукавними фільтрами [3, 4]. У 70-х роках минулого століття у виробництві сухих молочних продуктів рукавні тканинні фільтри для очищення відпрацьованого повітря почали замінювати циклонами з системами механізованого миття. При цьому циклони мають недостатню ефективність очищення 85...90 %. Уміст пилу у повітрі на виході системи очищення досягає 250 мг/м³.

Причиною такої заміни була підвищена трудомісткість експлуатації фільтрів та високі витрати на прання тканинних рукавів. У 2007 році в країнах ЄС посилено обмеження до пилових викидів з показниками вмісту менше ніж 10 мг/м³. Досягнути таких результатів можна лише за очищення в рукавних фільтрах. Це потребує виконання дослідницьких робіт з метою покращення експлуатаційних характеристик роботи фільтрів, зокрема зниження трудомісткості їх обслуговування. Для цього виконано теоретичні й

експериментальні дослідження в ході розроблення й удосконалення рукавних тканинних фільтрів для розпилювальних установок сушіння молочних продуктів [2] на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» (м. Калинівка, Вінницька обл.).

Актуальність дослідження. Теоретичні й експериментальні дослідження процесу очищення в тканинному рукавному фільтрі відпрацьованого теплоносія-повітря на виході з розпилювальної установки сушіння молочних продуктів з метою зниження питомої витрати молочної сировини на 1 кг сухого очищеного молока та забезпечення сучасних санітарних вимог є важливим завданням в підвищенні експлуатаційної ефективності технологічного обладнання.

Дослідження проводились у процесі освоєння виробництва на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» вискоєфективних тканинних рукавних фільтрів санітарного виконання. Результати впроваджені в конструкції тканинних рукавних фільтрів для розпилювальної сушильної установки продуктивністю за випареною вологою від 500 до 2500 кг/год.

Останні дослідження та публікації. Дослідженням за напрямком зниження антропогенного негативного впливу на навколишнє середовище промисловими та теплоенергетичними підприємствами присвячено багато теоретичних і експериментальних робіт. Наряду з модернізацією технологічного обладнання значну частку у зменшенні забруднення довкілля та підвищенні ефективності виробництва займає газоочисне обладнання. На підприємствах молочно-консервної галузі сушіння молочних продуктів як кінцевий технологічний процес супроводжується великими втратами молочного порошку у вигляді зважених пилових частинок у відпрацьованих газах, збільшеної витрати сировини на одиницю продукції та невідповідності сучасним екологічним вимогам.

Очищення газових потоків шляхом уловлювання пилових частинок може здійснюватися за різними технологічними схемами в апаратах сухого (пилоосаджувальні камери, циклони та мультициклони, рукавні фільтри, електрофільтри) та мокрого (скрубери різних типів) очищення [5, 6]. З аналізу наявних засобів очищення газів висока ефективність досягається в двоступеневих системах очищення із застосуванням як апаратів другого ступеня скруберів, електрофільтрів або рукавних фільтрів.

Для всіх методів мокрого очищення основний недолік – це утворення великих обсягів рідких відходів з необхідністю виконання замкнутої водопровідної системи з утилізуванням твердих частинок. Застосування вискоєфективних скруберів Вентурі з ефективністю очищення до 99 % не прийнятне за великих втрат енергії на подолання високого гідравлічного опору. Практика застосування з 70-х років минулого століття у виробництві сухих

молочних продуктів для очищення відпрацьованого повітря розпилювальних сушильних установок циклонів з системами автоматизованого миття показала недостатню ефективність очищення для забезпечення новітніх екологічних вимог [7,8]. Результати впровадження циліндричних скрубєрів з невеликим гідравлічним опором [8], долучених до системи рекуперації із зрошенням запиленого теплоносія-повітря сирим молоком, не були опубліковані.

Висока ефективність очищення газів від дрібнодисперсних частинок досягається в електрофільтрах – 95...99 % (розмір частинок 0,1 мкм) та рукавних фільтрах – до 99 % (розмір частинок 0,5 мкм).

Практика застосування електрофільтрів показала, що в умовах експлуатації їхні показники ефективності очищення знижуються до 90-97 % через складнощі підтримання потрібних режимних параметрів: низької швидкості газового потоку, оптимального питомому опору, необхідного режиму струшування електродів тощо. Також недоліком електрофільтрів є робота під нагнітанням з відкритим вихлопом до атмосфери. При цьому запилений потік в нагнітальній мережі викликає прискорений абразивний знос вентиляторів. Тому їхнє застосування, ураховуючи підвищені екологічні вимоги до шкідливих викидів та необхідність зниження норм витрати молочної сировини на одиницю продукції, є можливим за відповідного техніко-економічного обґрунтування.

Застосування рукавних фільтрів як засобів очищення повітряних і газових потоків від пилу відомо з кінця IX століття. Хронологія розвитку рукавних фільтрів стосовно застосування різних способів їхнього регенерування [3, 4, 6, 7, 9]:

- 1900 рік – струшування;
- 1920–1930 – комбінація струшування та зворотного продування;
- 1940 рік – струменеве продування повітрям, що подається з рухомого кільця;
- 1957 год – імпульсне струшування стисненим повітрям.

У 50–60 роках минулого століття на вітчизняних молочних заводах використовувалися сушильні установки ЦТР-500 фірми «Нема» (Німеччина) з рукавними фільтрами [4], які експлуатувалися протягом тривалого часу.

Зараз рукавні тканинні фільтри застосовують у закордонній і вітчизняній практиці в різних галузях промисловості, що зумовлено високими техніко-економічними показниками їхньої роботи. Здебільшого застосовують фільтрування з імпульсним регенеруванням:

- одностороннім для рукавів завдовжки до 4 м;
- двостороннім для рукавів завдовжки 6 м;
- зворотне продування очищеним повітрям для рукавів завдовжки 8 м і більше.

У коксохімічній і металургійній промисловості [10] та теплоенергетиці [11] широкого розповсюдження набули новітні рукавні фільтри з фільтрувальними

тканинами, які витримують високу температуру від 150 до 280 °С, значну вологість і наявність у димових газах агресивних компонентів – оксидів сірки й азоту, хлористого водню тощо.

Ураховуючи підвищені екологічні вимоги до зниження шкідливих викидів, застосування рукавних тканинних фільтрів, модернізованих для забезпечення санітарних норм в експлуатаційних умовах розпилювальних установок сушіння молочних продуктів, є важливим для подальшого прогресивного розвитку молочно-консервної галузі.

У даній роботі розглянуто вдосконалення конструктивних і режимних параметрів рукавного фільтра на підставі теоретичних та експериментальних досліджень процесу очищення повітря від дрібнодисперсного молочного пилу.

Метою роботи є дослідження основних процесів фільтрування тканинних рукавних фільтрів при очищенні відпрацьованого повітря, запиленого молочним порошком, на виході розпилювальних сушильних установок для оптимізації їх конструктивних і режимних параметрів експлуатації із забезпеченням сучасних санітарних норм.

У статті викладено результати теоретичних і експериментальних робіт проведених на ПрАТ «Калинівський машинобудівний завод» в ході розроблення й удосконалення конструкції тканинних рукавних фільтрів, які виробляються на цьому підприємстві.

Конструкція фільтра У роботі розглянуто вдосконалену конструкцію рукавного фільтра для зниження викидів молочного пилу з відпрацьованим теплоносієм-повітрям, розробленої за результатами теоретичних, експериментальних та експлуатаційних досліджень з метою підвищення її ефективності завдяки зменшення питомої витрати молочної сировини, забезпечення сучасних екологічних показників та покращення експлуатаційних характеристик (рис.1).

Конструкція фільтра при витраті повітря на вході 28000 кг/год передбачає:

- циліндричний корпус діаметром 3300 мм зі спіральним входом запиленого повітря;
- верхню камеру очищеного повітря;
- перфоровану плиту;
- 140 рукавів діаметром 160 мм завдовжки 4000 мм з підтримувальними дрововими каркасами, що закріплені в отворах перфорованої плити.
- вихідний патрубок;
- конусний продуктовий бункер;
- нижню камеру з транспортним перфорованим дном.

Рукав фільтрувального полотна прошитий потрійним поздовжнім швом. Відкритий кінець рукава має вшиту кільцеву пружину, за допомогою якої фіксується з ущільненням в отворі трубною плити.

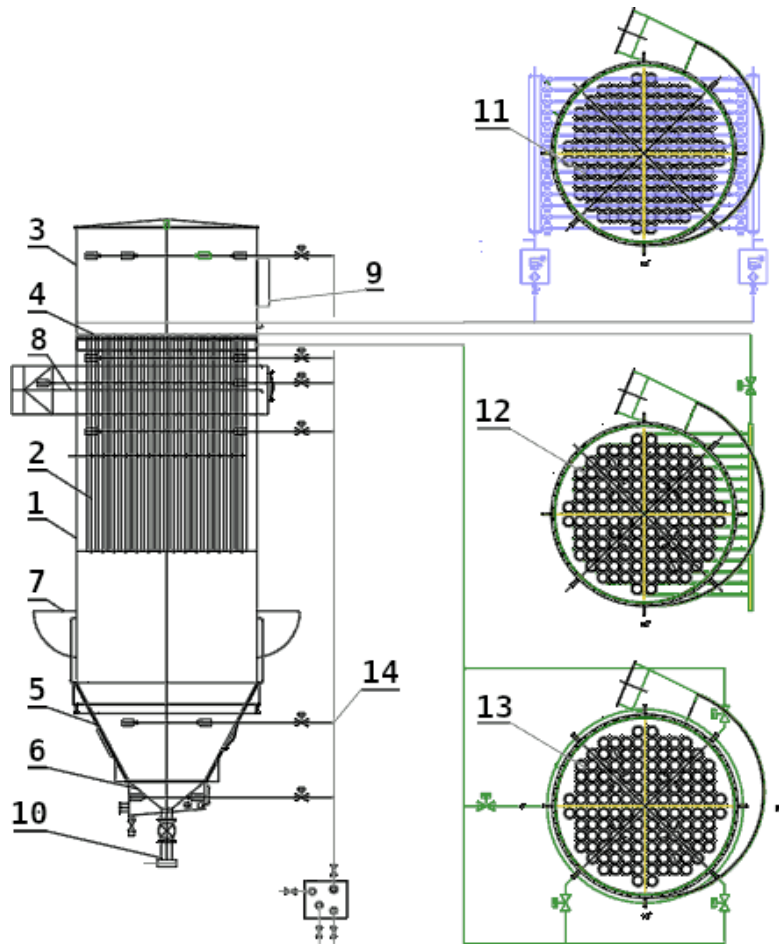


Рис. 1. Схема рукавного фільтра для очищення повітря запиленого молочним порошком з автоматизованими технологічними процесами фільтрації, імпульсної регенерації, прання та сушіння:

1 – циліндричний. корпус запиленого повітря; 2 – комплект фільтрувальних рукавів; 3 – верхня камера очищеного повітря; 4 – рукавна перфорована плита; 5 – конусний корпус з повітряним нагріванням; 6 – нижня продуктова камера з повітряним дном; 7 – вибухозахисні мембрани; 8 – вхід запиленого повітря; 9 – вихід очищеного повітря; 10 – вивантаження продукту; 11 – система імпульсного очищення стисненим повітрям; 12 – система прання рукавів, 13 – система миття рукавної плити; 14 – система мийки корпусу

Усередині рукава розміщено каркас із дроту діаметром 3 мм. Оголовок каркаса виготовлений з опорних прутків діаметром 5 мм, на яких закріплено конічний конфузор зі зменшенням діаметра згори донизу від 105 мм до 69 мм для здійснення процесу імпульсного очищення. Фільтрувальний матеріал рукава – неткане голкопробивне поліефірне полотно «fibertex» 1568 з такими характеристиками:

- питома маса 550 г/м²;
- розривне навантаження (смуги 50x100 мм) 1000 Н;
- повітропроникність чистого полотна 100 дм³/(м²с).

Такий синтетичний матеріал допущений до контакту з харчовими продуктами. Допустима температура при постійній роботі становить 130 °С, при короткочасній – 160 °С. Останнім часом застосовується фільтрувальне полотно М-арамід з робочою температурою 200 °С. Придатність фільтрувального матеріалу для прання і стійкість до впливу мийного розчину перевірено в лабораторних умовах шляхом проведення дослідів щодо фільтрації, прання та сушіння.

Технологічний процес очищення запиленого повітря здійснюється за допомогою конструктивно реалізованих в установці елементів:

- рукавного фільтра системи фільтрування;
- імпульсного продування рукавів стисненим повітрям;
- накопичення та видалення продукту;
- механізованого миття корпусу й прання рукавів;
- вузла підготовки й подавання нагрітого повітря до продуктового бункера;
- камери транспортного днища.

Лабораторні дослідження процесу фільтрування в рукавному фільтрі.

Процес фільтрування запиленого повітря передбачає два основних параметри – ефективність очищення (вміст пилу в повітрі на виході) та допустиме питоме навантаження (швидкість повітря або аеродинамічний опір).

Необхідно відмітити, що тканина рукава фільтра як фільтрувальна перегородка є основою для формування й утримування фільтрованого пилового шару [12]. У випадку застосування розпилювальних сушильних установок для отримання сухих молочних продуктів утворений на фільтрувальному матеріалі пиловий шар з частинок розміром від 5 мк до 85 мк забезпечує вміст пилу в повітрі на виході в атмосферу не вище нормативного 10 мг/м³ [7, 20]. У зв'язку з цим основним завданням досліджень цієї роботи є визначення аеродинамічного опору в процесі фільтрування.

Лабораторні дослідження проводилися на двох типах лабораторних моделей (рис. 2), трьох варіантах стендів з повнорозмірними рукавами завдовжки 2,5 м, 4 м і 6 м (рис. 3), а також на промислових зразках фільтрів з рукавами довжиною 2,5 м, 4 м і 6 м з відповідною площею фільтрування.

Мета досліджень – визначення повітропроникності, аеродинамічного опору фільтрувального полотна:

- чистого;
- запиленого;
- мокрого в стані прання;
- висушеного після прання.

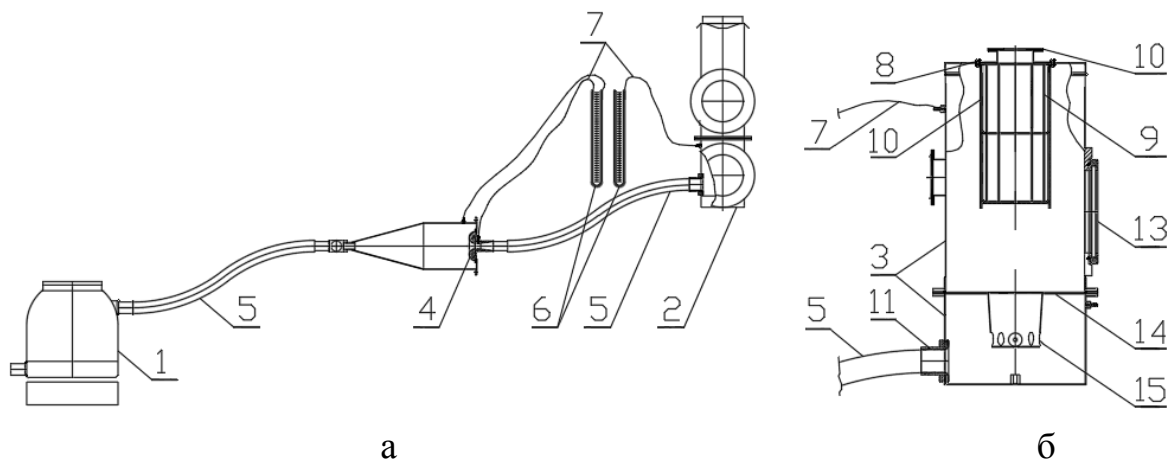


Рис. 2. Схеми лабораторних стендів:

а – продування зразків фільтрувальних тканин; *б* – дослідження моделі рукавного фільтра; 1 – пилосос подавання повітря; 2 – робоча прямокутна камера; 3 – робоча циліндрична камера; 4 – блок вимірювання витрати повітря; 5 – приєднувальні рукави пилососу до випробувальних камер; 6 – U-подібні водяні манометри; 7 – рукави до манометрів; 8 – легкознімна кришкою; 9 – фільтрувальний рукав завдовжки 300 мм і діаметром 150 мм; 10 – каркас; 11 – патрубок подавання повітря на очищення; 12 – патрубок виходу очищеного повітря; 13 – оглядовий люк; 14 – перегородка; 15 – заповнена молочним порошком посудина для разового запилення

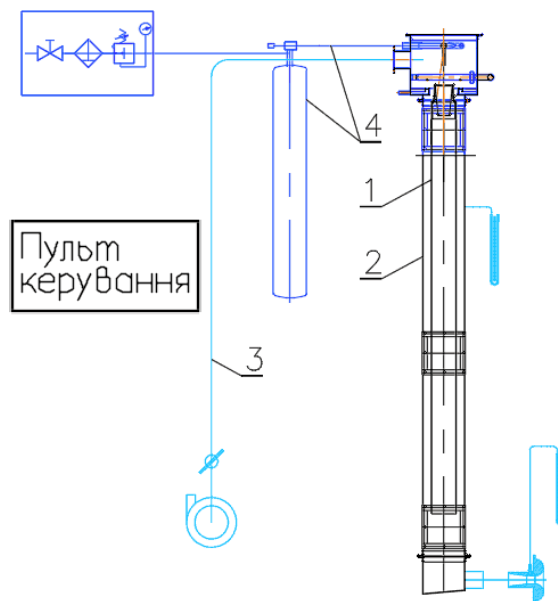


Рис. 3. Схема стенду випробування повнорозмірного тканинного рукава фільтра:

1 – рукав; 2 – каркас; 3 – система видалення запиленого повітря; 4 – система імпульсного струшування

Фільтрування крізь чисте сухе фільтрувальне полотно.

Повітропроникність характеризується кількістю повітря, здатного проникнути крізь одиницю площі фільтрувального матеріалу за одиницю часу при заданому перепаді тиску (надлишковому чи розрідженні) – $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при перепаді тиску $\Delta P_0 = 49 \text{ Па}$ (5 мм вод. ст.). Для фільтрувальних тканин ця величина становить від 50 до 150 $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ або 3...9 $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{хв})$. Перепади тиску в рукавних фільтрах досягають величини $\Delta P = 1000 \dots 1500 \text{ Па}$.

Дослідження зміни повітропроникності фільтрувального матеріалу залежно від перепаду тиску в зазначеному діапазоні проведено на лабораторному стенді (рис. 2, а). Робочим елементом його є прямокутна камера 4 перерізом 195×145 мм, яка має нижню камеру подавання повітря заввишки 200 мм і верхню шахту заввишки 500 мм. Під час випробувань у фланцевому з'єднанні частин камери затискується зразок фільтрувальної тканини.

Результати дослідження витрати повітря на сухій чистій тканині (полотно поліпропіленове голкопробивне фільтрувальне Н-РР/РР500) з питомою масою 556 $\text{кг}/\text{м}^2$ наведено на рис. 4. Аеродинамічний опір фільтрувальної тканини має лінійну залежність від витрати повітря. Отже, рух повітря в тканині (і шарі відкладення пилу) є процесом фільтрування крізь пористу структуру та підлягає закону Дарсі – лінійній залежності швидкості повітря від перепаду тиску [13].

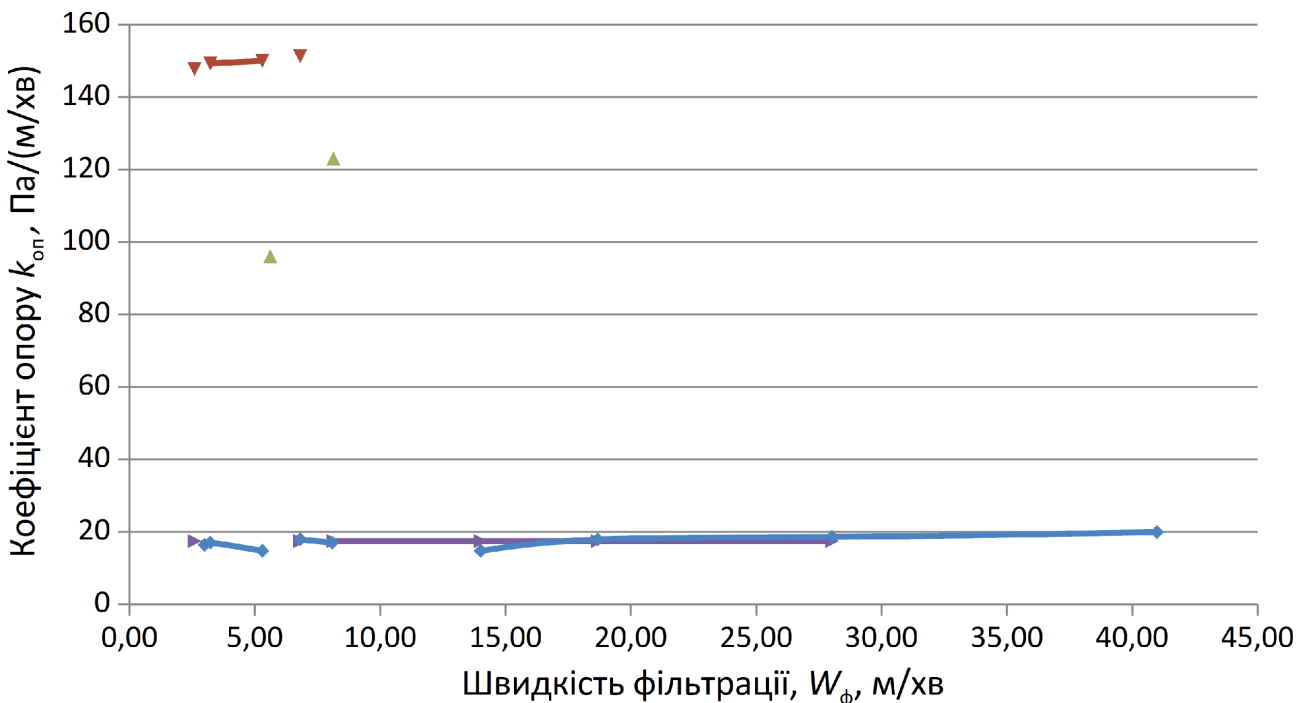


Рис. 4. Коефіцієнти аеродинамічного опору фільтрувального полотна залежно від швидкості фільтрації.

— чистого; — запиленого; — вологого; — середнє значення коефіцієнта опору

За технічними умовами при перепаді тиску $\Delta p_{my} = 49$ Па повітропроникність досліджуваної тканини становить $\Pi_{my} = 3,0$ м³/(м²·хв). За результатами випробувань при перепаді тиску $\Delta P = 137$ Па повітропроникність становить $\Pi_{\phi} = 8,09$ м³/(м²·хв). При перерахунку на нормативний перепад тиску $\Delta P = 49$ Па маємо $\Pi_{\phi} = 2,9$ м³/(м²·хв). Коефіцієнт опору в дослідях знаходився в межах 14,7...19,9 Па/(м³/(м²·хв)) при середньому значенні 17,4 Па/(м³/(м²·хв))⁰.

Фільтрування крізь запилене полотно. Схема лабораторного стенда моделі для одноразового запилення та продування рукава фільтра наведена на рис. 2, б. Робочим елементом стенда є циліндрична камера 5 діаметром 300 мм, яка має нижню камеру подавання повітря заввишки 200 мм і верхню шахту висотою 500 мм. Камера зверху закрита легкознімною кришкою 8, до якої підвішується фільтрувальний рукав 9 завдовжки 300 мм і діаметром 150 мм на каркасі 10. Подавання повітря на очищення здійснюється патрубком 11, а вихід очищеного повітря з рукава передбачено в атмосферу патрубком 12. У фланцевому з'єднанні між нижньою і верхньою камерами затискується перегородка, у яку крізь відкритий оглядовий люк 13 вставляється заповнена молочним порошком посудина 14 для разового запилення. Посудина має отвори вздовж периферії кола днища. При подаванні повітря порошок повністю вивувається й осідає переважно на фільтрувальному рукаві.

Досліди проводилися на товарному сухому знежиреному молоці. Фракційний склад молока прийнято за даними [14], медіанний діаметр частинок $d_m = 38$ мкм.

У процесі дослідження запилення моделі фільтра було проведено декілька циклів запилення (з пуском і зупиненням) до досягнення необхідного аеродинамічного опору. Для кожного циклу після фіксування тиску й зупинення процесу верхня кришка із запиленим фільтром знімається й зважується. Різниця маси між запиленим і чистим фільтром відповідає масі напиленого порошку на фільтрувальній тканині.

Результати оброблення дослідів для чистого, запиленого й вологого полотна у формі залежності коефіцієнтів опору від швидкості повітря для їхнього порівняння наведено на рис. 5. У випадку запилення при постійному його рівні 600 г/м² швидкість повітря W_{ϕ} , м/хв, змінювалася від 2,6 м/хв до 6,8 м/хв. Коефіцієнт опору $k_{on} = \Delta P / W_{\phi}$ у всьому діапазоні зміни швидкості залишався постійним із середнім значенням 149,5 Па/(м·хв) та відхиленням не більше ± 1 %. Таким чином, аеродинамічний опір запиленої фільтрувальної тканини, як і чистої тканини, має лінійну залежність від витрати повітря. Проникнення повітря крізь пористу структуру шару порошку й тканини є процесом фільтрування, який підлягає закону Дарсі [13].

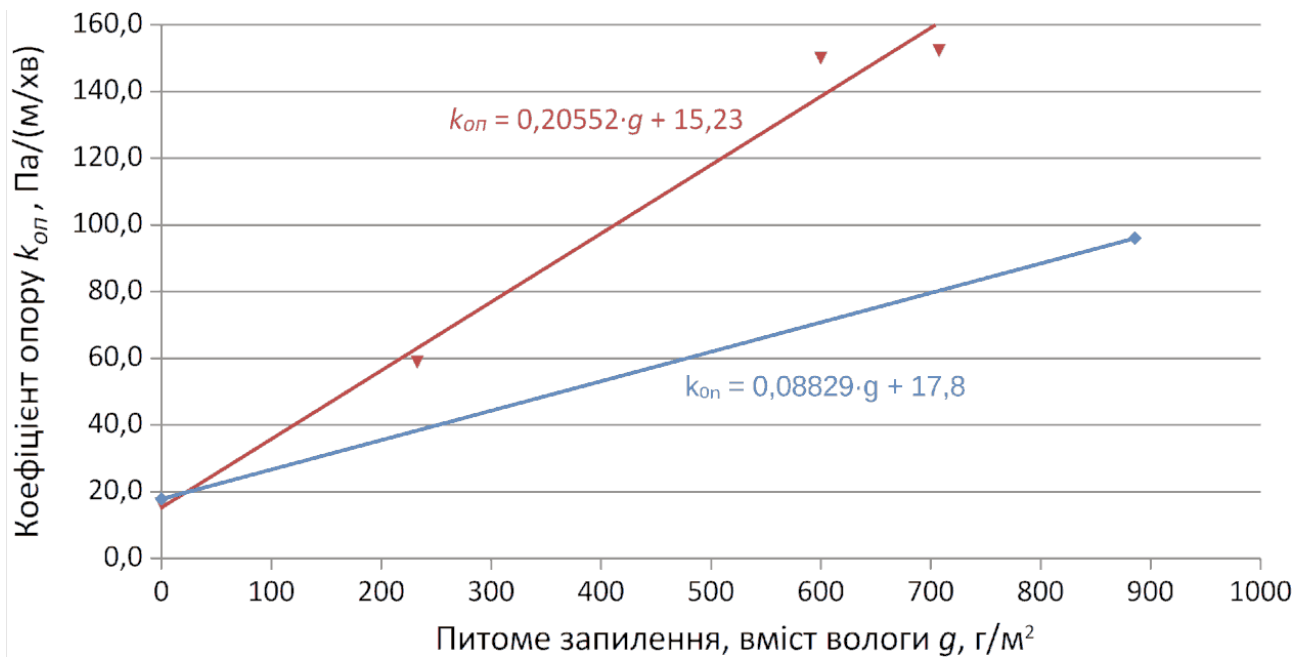


Рис. 5. Залежність коефіцієнта аеродинамічного опору від вмісту вологої і пилової частини:

▼ – запилення; ◆ – волога

При проведенні дослідів величина запилення збільшувалася від 0 (чиста тканина) до 600 г/м². При цьому коефіцієнт опору зростає від 12 Па/(м/хв) до 156 Па/(м/хв), що відповідає апроксимаційному рівнянню

$$k_{оп} = 15,23 + 0,206 \cdot g_{зн}, \quad (1)$$

де $g_{зн}$ – питоме запилення полотна, г/м².

На підставі отриманого рівняння (1) є можливість розрахунку питомого запилення полотна за відомою величиною коефіцієнта опору:

$$g_{зн} = (k_{оп} - 15,23) / 0,206. \quad (2)$$

Фільтрування крізь вологе полотно. Дослідження процесу фільтрування з використанням вологого полотна проводилися на лабораторній моделі з прямокутною камерою з перерізом у плані 190×140 мм. На зразок полотна накладалася гідроізоляція на площі прилягання фланця, зразок зважувався в сухому стані, проводилося дослідження фільтрування сухого зразка. Після цього зразок зволожувався, зважувався у зволоженому стані та затискувався у фланцевому з'єднанні камери. Далі проводилося продування повітрям з приміщення протягом 1...30 хв з вимірюванням витрати повітря й аеродинамічного опору. Дані вимірювання наприкінці продування та

зважування після завершення продування використовувалися для аналізу.

На рис. 4 наведені коефіцієнти опору запиленого полотна Па/(м/хв) залежно від швидкості повітря в м/хв, а також вологого полотна при питомому вмісті води 886 г/м². Ця залежність має виражений лінійний характер і описується рівнянням:

$$k_{\text{оп}} = 17,8 + 0,088 \cdot g_{\text{в}}, \quad (3)$$

де $g_{\text{в}}$ – питомий вміст води, г/м².

Розрахунковий аналіз аеродинамічного опору фільтрувального полотна.

Процес фільтрування крізь *сухе полотно* поліпропіленове голкопробивне фільтрувальне Н-РР/РР500 проаналізовано на підставі стендових випробувань на прямокутній моделі (рис. 2, а) з використанням розрахункових залежностей [15]:

число Рейнольдса

$$Re = \omega \cdot d / \nu; \quad (4)$$

коефіцієнт опору тертя

$$\lambda = 2056 / Re; \quad (5)$$

аеродинамічний опір полотна

$$\Delta P = \lambda \frac{\delta}{d} \frac{\rho \omega^2}{2} \frac{(1 - \xi)^2}{\xi^3}, \quad (6)$$

де ω – швидкість повітря, м/с; d – діаметр волокна, м; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м²/с; δ – товщина тканини, м; ρ – густина повітря, кг/м³; ξ – частка вільного об'єму матеріалу.

При обробленні даних зразка фільтрувального полотна розміром 0,135×0,19 м, завтовшки 2,25 мм та питомою масою 556 г/м² було прийнято режим зі швидкістю фільтрування $\omega = 28$ м/хв, аеродинамічний опір становив $\Delta P = 520$ Па. Діаметр волокна визначався шляхом циклічних розрахунків з порівнянням розрахованого аеродинамічного опору полотна при попередньо прийнятій величині діаметра волокна з отриманим опором у випробуваннях.

При об'ємній питомій масі досліджуваного зразка поліпропіленового полотна $0,9 \text{ г/см}^3$ об'єм волокон становить 622 см^3 на 1 м^2 , а частка вільного об'єму матеріалу – $\xi = 0,724$.

Розрахунковий діаметр волокна становить $0,091 \text{ мм}$, номер волокна (довжина нитки в м об'ємом 1 см^3) – 154. Відповідно, сумарна довжина волокон в 1 м^2 полотна дорівнює $76,9 \text{ тис. м}$, а їхня зовнішня поверхня – 22 м^2 .

На підставі отриманої аеродинамічної характеристики зразка матеріалу розраховано аеродинамічний опір сухого полотна в діапазоні швидкості фільтрування від 3 до 41 м/хв, який зростає лінійно від 56 Па до 764 Па (рис. 6).

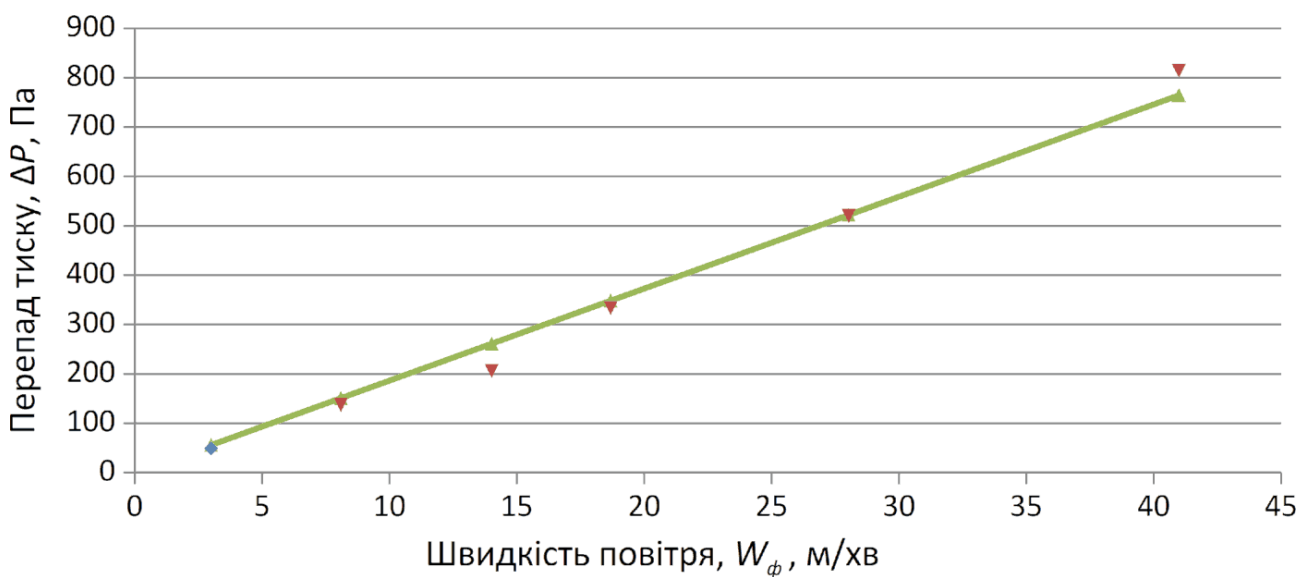


Рис. 6. Аеродинамічний опір чистого фільтрувального полотна.

—◆— за технічними умовами на полотно; ▼— результати випробувань;
—▲— розрахункові дані

Процес фільтрування крізь **запилене** **полотно** поліпропіленове голкопробивне фільтрувальне Н-РР/РР500 проаналізовано (рис. 7) на підставі лабораторних випробувань моделі рукава (рис. 2, а) з використанням розрахункових залежностей (4-6).

Розрахунок проведено на базі досліду зі швидкістю фільтрування $2,59 \text{ м/хв}$, аеродинамічним опором 384 Па і питомим запиленням 600 г/м^2 . Медіанний розмір частки становив 38 мк , питома густина продукту в частці $1,3 \text{ г/см}^3$. У циклічних розрахунках приведення розрахункового аеродинамічного опору до дослідної величини здійснювалося за рахунок пошукового визначення частки вільного об'єму шару.

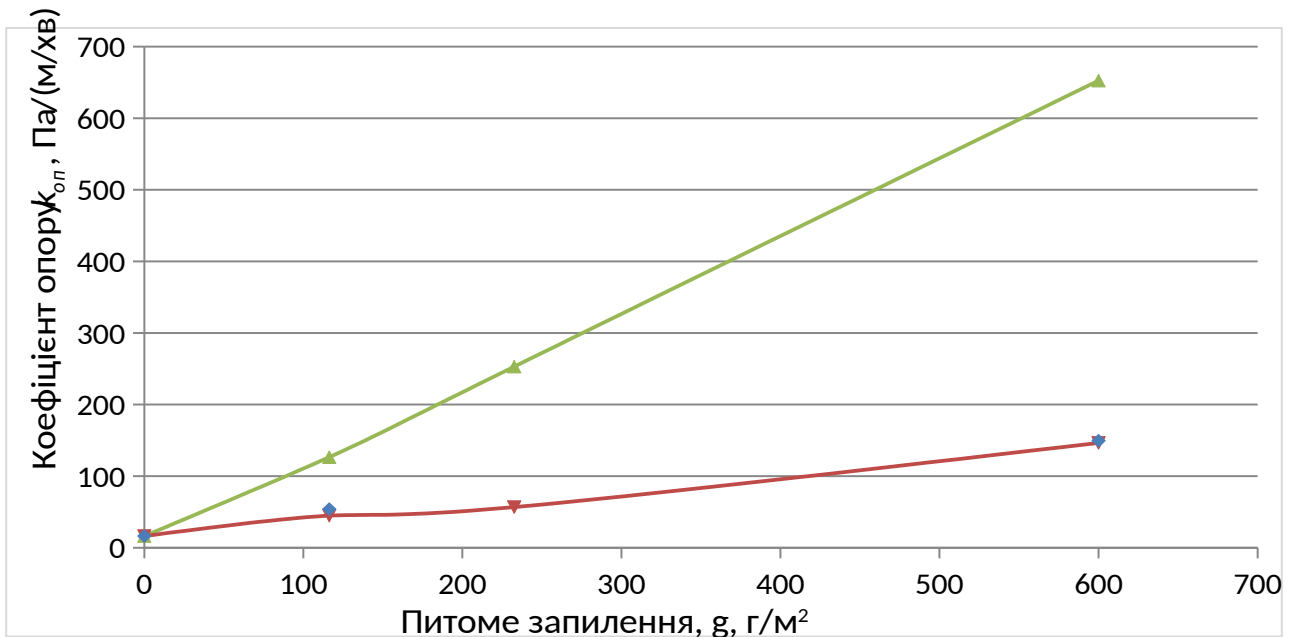


Рис. 7. Аеродинамічний опір запиленої тканини.

◆ – експериментальні дані ($d_m = 38$ мкм); ▼ – розрахунок ($d_m = 38$ мкм);
 ▲ – розрахунок ($d_m = 18$ мкм)

Визначена частка вільного об'єму становить 0,336, насипна густина шару – 0,336 г/м³, товщина шару порошку – 1,78 мм. Отримані характеристики пилового шару відповідають подаванню на фільтр запиленого повітря з сушильної камери (одноступеневе очищення).

Для отримання характеристик пилового шару при двоступеневому очищенні визначено фракційний склад порошку після циклонів за методикою [12] для наявного промислового зразка рукавного фільтра продуктивністю 28000 м³/год.

Циклон має такі параметри:

- діаметр $D_{\text{кц}} = 2,28$ м;
- площа перерізу корпусу $F_{\text{кц}} = 4,1$ м²;
- площа вхідного патрубку $F_{\text{вх}} = 0,302$ м²;
- площа вихідного патрубку $F_{\text{вих}} = 1,13$ м²;
- коефіцієнт опору – 907 [16].

Параметри фракційної ефективності визначено за рекомендаціями [12, 17].

Визначено ефективність уловлювання фракції від 6,2 до 78 мкм. На виході збільшилася частка дрібних фракцій, при цьому медіанний діаметр частки пилу з 38 мкм знизився до $d_m = 18$ мкм. При однаковій швидкості фільтрування 2,59 м/хв і однаковому опорі 380 Па розрахункова висота шару зменшується в 4 рази з 2,4 мм до 0,6 мм. Тому у розрахунок коефіцієнту опору від питомого запилення потрібно вводити поправку $(38/d_m)^2$.

Експериментальні дослідження фільтрування при запилюванні рукава з імпульсним очищенням. Дослідження процесу фільтрування запилення зразка рукава фільтра завдовжки 4 м при запилюванні та періодичному імпульсному струшуванні з аналізом зміни його опору виконано на повнорозмірному стенді (рис. 3).

Стенд має такі складові:

- шахту квадратного перерізу 250×250 мм з установленим фільтрувальним рукавом;
- систему подавання повітря з витяжним вентилятором, вимірювальним соплом і регулювальним шибером;
- систему стисненого повітря з вузлом підготовки повітря, ресивером, імпульсним клапаном, соплом і дифузором;
- блок управління.

Зміну аеродинамічного опору рукава при запиленні рукава завдовжки 4 м наведено на рис 8.

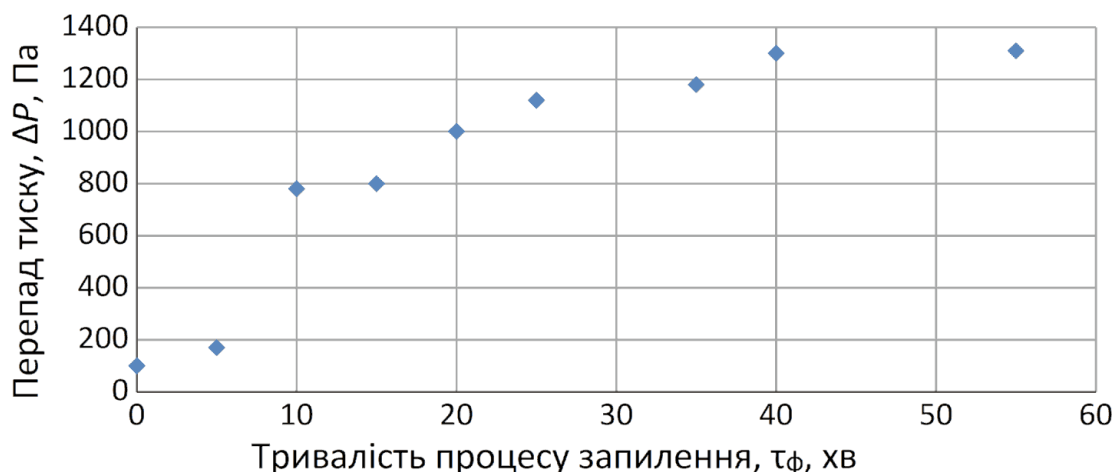


Рис. 8. Зміна аеродинамічного опору рукава при запиленні

У дослідях витяжний вентилятор працював на номінальних обертах, регулювальний шибер повністю відкритий, в потік повітря дозувався порошок сухого знежиреного молока. Проводилися заміри витрати повітря й аеродинамічного опору запиленого рукава. При обробленні результатів замірів визначався коефіцієнт опору тканини – відношення перепаду тиску в Па до швидкості фільтрування. Питоме запилення полотна розраховувалося за формулою (2).

На початку дослідів швидкість фільтрування становила 3,23 м/хв, коефіцієнт опору становив 30,9 Па/(м/хв), розрахункове запилення полотна 81,7 г/м². Наприкінці дослідів швидкість фільтрування знизилася до 1,91 м/хв, коефіцієнт опору зріс до 684 Па/(м/хв), розрахункове запилення стабілізувалося

на рівні 2984 г/м^2 .

Аналогічний характер процесу запылення фільтрувального рукава без його імпульсного очищення досліджено в [20]. При швидкості фільтрування 8 м/хв та вмісті пилу в повітрі $34,7 \text{ г/м}^3$, аеродинамічний опір рукава протягом 60 хв зростає до 4000 Па . На цьому рівні опір стабілізується. Наступає режим гравітаційного самоочищення рукава від пилу. За фактом гравітаційного самоочищення рукава можливо зробити висновок, що інтенсивність імпульсного очищення стисненим повітрям зростає зі збільшенням питомого запылення тканини.

Імпульсне очищення рукава проводилося стисненим повітрям з інтервалом 40 с подачі імпульсів (рис. 9). Протягом очищення на вхід подавалося чисте повітря без додавання порошку. Опір запыленого полотна визначали після кожного імпульсу струшування і наприкінці кожної паузи, що тривала 40 с, безпосередньо перед наступним струшуванням.

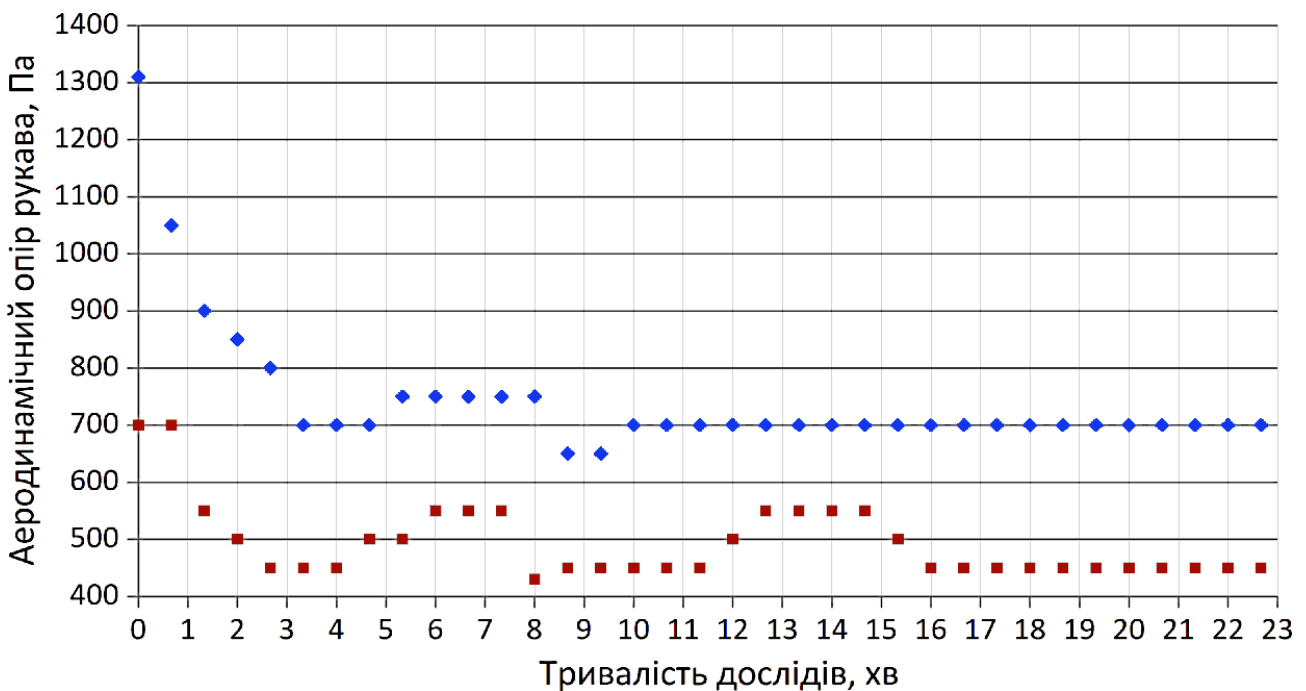


Рис. 9. Аеродинамічний опір рукавного фільтра при імпульсному струшуванні:

■ – одразу після кожного імпульсу струшування

◆ – наприкінці кожної паузи (протягом 40 с) перед наступним струшуванням.

При першому струшування тиск знизився з 1310 Па до 700 Па , коефіцієнт опору знизився з $684 \text{ Па/(м}\cdot\text{хв)}$ до $356 \text{ Па/(м}\cdot\text{хв)}$, розрахункове питоме запылення зменшилося з 2984 г/м^2 до 1568 г/м^2 . За 40-секундної паузи спостерігалось підвищення опору до 1050 Па і питомого запылення до 2160 г/м^2 , що пов'язано з поверненням потоком повітря струшеного порошку на рукав.

Отримані розрахункові дані по запыленню дозволяють вираховувати як долю

від питомого запилення скиду пилу з полотна, його повернення на полотно та осідання в шахті (вивантаження). При початковому запиленні рукава 3000 г/м^2 під дією імпульсу скидається 50 % порошку, 30 % повертається назад на рукав і 20 % йде на вивантаження. Після зниження запилення до 1500 г/м^2 з рукава скидається 40 % порошку і весь порошок повертається на рукав. Процес стабілізується, весь скинутий порошок повертається на рукав, лінії тиску після струшування і в кінці паузи пролягають паралельно.

Зафіксовані дві ділянки збільшення опору і рівня запилення, викликаного обрушення відкладення пилу з стінок корпусу і повторним запиленням тканини.

Розрахунок рукавного фільтра за результатами досліджень фільтрування. Отримані характеристики процесу фільтрації запиленого полотна дозволяють розрахувати площу поверхні фільтра за прийнятим аеродинамічним опором фільтра та матеріальним балансом запилення. Приклад розрахунку методом циклічного пошуку рішення наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Приклад розрахунку методом циклічного пошуку рішення

№ з/п	Найменування	Схеми очищення			
		Одиниці вимірювання	Одноступенева, розрахунок	Двоступенева	
				розрахунок	експеримент
1	Витрата повітря	м ³ /год	28000	28000	28000
2	Продуктивність за продуктом	кг/год	1000	1000	1000
3	Відсоток виносу	%	10	1	—
4	Вміст пилу в повітрі	г/м ³	3,57	0,36	—
5	Надходження пилу	кг/год	100	10	—
6	Коефіцієнт вивантаження (прийнято)	—	0,62	0,16	—
7	Відкладення пилу	кг/год	37,6	8,4	—
8	Допустимий опір	Па	1000	1000	1000
9	Площа фільтра (прийнята)	м ²	284	284	284
10	Швидкість фільтрування	м/хв	1,64	1,64	1,64
11	Час стабілізації шару	год	20	20	20
12	Питоме запилення	г/м ²	2648	592	593,7
13	Медіанний діаметр частинок	мк	38	18	18
14	Коефіцієнт опору пилу	Па/(м/хв)	609	607	608,5
15	Опір розрахунковий	Па	1001	996	—
16	Відношення	—	1,0007	0,9964	—
17	Коефіцієнт вивантаження	—	0,624	0,16	0,23

Розглянуто дві схеми роботи фільтра: одноступеневу (фільтр після сушильної камери) та двоступеневу – фільтр є другим ступенем після циклонів. Витрата повітря, площа фільтра та допустимий опір однакові. Прийнято, що вміст пилу в повітрі на вході до фільтра змінюється в 10 разів з $3,57 \text{ г/м}^3$ до $0,36 \text{ г/м}^3$, а медіанний розмір часток становить 38 мкм і 18 мкм. Завданням розрахунку є визначення коефіцієнта вивантаження, за якого розрахунковий опір дорівнюватиме заданому. Задача вирішується циклічними розрахунками.

За прийнятим коефіцієнтом вивантаження визначають такі величини:

- питоме запилення;
- коефіцієнт опору з поправкою на медіанний діаметр частинки – $(38/d_m)^2$;
- розрахунковий опір.

У першій схемі питоме запилення становить 2648 г/м^2 і коефіцієнт вивантаження, який повинна забезпечити система імпульсного очищення, дорівнює 0,624. У другій схемі завдяки підвищеному опору дрібного пилу ці параметри становлять 606 г/м^2 і 0,16. Дані висновки підтверджені результатами експлуатаційних випробувань (таблиця 1).

Отримані характеристики процесу фільтрування запиленого полотна дозволяють за площею фільтра, вмістом пилу на вході та аеродинамічним опором розрахувати матеріальний баланс запилення. Зокрема визначають коефіцієнт вивантаження (відношення маси вивантаженого порошку до маси поданого з повітрям) як параметр роботи системи імпульсного очищення (таблиця 1). Для двоступеневого очищення ця величина повинна бути 0,16.

Коефіцієнт вивантаження забезпечується в процесі налагоджування системи імпульсного очищення. Одночасно цей параметр може бути визначений за даними експлуатаційних випробувань. Протягом перших 20 годин роботи подано 220 кг продукту (200 кг вивантажено – дані експлуатації, 20 кг залишилось на полотні). При аеродинамічному опорі 1000 Па відкладення на полотні становить 168 кг, а видалено при імпульсному очищенні 51,4 кг. Коефіцієнт вивантаження становить 0,23 проти 0,16 за балансом запилення.

Формулу для прямого розрахунку площі фільтра можна отримати зі співвідношення для визначення аеродинамічного опору фільтра, Па:

$$\Delta P = k_{on} \cdot W_{\phi}, \quad (7)$$

де k_{on} – коефіцієнт аеродинамічного опору, Па/(м/хв)

$$k_{on} = 0,23 \cdot g_{зан} = 0,23 \cdot \frac{G_{відкл}}{F_{\phi}} \cdot \left(\frac{38}{d_m} \right)^2; \quad (8)$$

де $G_{\text{відкл}}$ – маса відкладень, г; F_{ϕ} – площа фільтрувальної поверхні, м²; $V_{\text{нов}}$ – витрата повітря, м³/год.

При цьому швидкість фільтрування становить, м/хв,

$$W_{\phi} = V_{\text{нов}} / (60 \cdot F_{\phi}). \quad (9)$$

За формулами (8) і (9) потрібна площа фільтрувальної поверхні дорівнює, м²,

$$F_{\phi} = \sqrt{\frac{0,23 \cdot G_{\text{відкл}} \cdot V_{\text{нов}}}{60 \cdot \Delta P}} \cdot \frac{38}{d_m} \approx \frac{2,353}{d_m} \cdot \sqrt{\frac{G_{\text{відкл}} \cdot V_{\text{нов}}}{\Delta P}}. \quad (10)$$

Особливості регенерування фільтра імпульсами стисненого повітря.

Детальне дослідження процесів і характеристик тканинних фільтрів зі зворотним імпульсним продуванням опубліковано в [9]. Регенерування фільтра здійснювалося подаванням до відкритого рукава стисненого повітря імпульсами тривалістю 0,1...0,2 с.

Встановлено, що основним механізмом очищення тканини від шару пилу є деформування (роздування) рукава під дією ударної хвилі. Максимальний надлишковий тиск на вході рукава створюється через 0,02 с від моменту відкриття клапана і на 25 % перевищує середній тиск протягом всього часу відкриття. За допомогою перетворювача виявлено, що всередині рукавів генерується ударна хвиля з достатньо низькою амплітудою. Затримання проходження ударної хвилі від верхньої частини рукава до нижньої становить приблизно 0,005...0,006 с, що відповідає часу проходження хвилі тиску на довжині рукава 1,82 м зі швидкістю звуку.

Об'єм повітря зворотного продування, що проходить крізь поверхню рукава до камери забрудненого повітря, розрахований за градієнтом тиску, такий же, як окремо виміряний об'єм первинного повітря сопла. Таким чином, ежекція первинним струменем чистого повітря з вихідної камери незначна, але такий потік достатній для видалення частинок, що залишилися при роздуванні рукава ударною хвилею.

Додаткові випробування при збільшеній тривалості подавання імпульсу стисненого повітря з 0,16 до 4 с не виявили покращання регенерування рукавів. Підтверджено, що ефект очищення визначається короткочасною дією ударної хвилі стисненого повітря, а не ежекційними характеристиками реверсивного повітряного потоку.

Відмічено також, що сопло для подавання стисненого повітря з огляду на

практичний досвід доцільно виконувати з гострими, а не закругленими краями. при цьому повинно бути враховано, що коефіцієнт витрати становить менше одиниці (від 0,6 до 0,95).

Таким чином, для ефективного регенерування рукава за короткий проміжок часу (0,1...0,2 с) повинна бути подана певна кількість стисненого повітря, що забезпечується тиском повітря і площею отвору (діаметром сопла). Рекомендації щодо діаметра сопел залежно від довжини рукава й тиску пари наводяться у [18]. У [19] стверджується, що довжина зони імпульсного продування не може перевищувати 3 м. Для рукавів завдовжки 6 м рекомендується двобічне подавання імпульсів стисненого повітря. Відмітимо також, що для фільтрів з рукавами завдовжки 10 і 12 м застосовується регенерування зворотним продуванням.

Принцип подавання стисненого повітря на фільтр вказано на загальній схемі (рис. 1, поз. 11). Система подавання стисненого повітря передбачає 2...4 живильні лінії діаметром умовного проходу 25 мм з вузлами підготовки повітря, 2...4 ресивери стисненого повітря об'ємом 265 дм³, імпульсні клапани Festo діаметром умовного проходу 40 мм, повітряні труби діаметром умовного проходу 40 мм з 1...7 соплами (отворами) з діаметром отворів 7...10 мм чи насадками Коанда. Схеми вузлів подавання в рукав імпульсів стисненого повітря наведена на рис. 10.

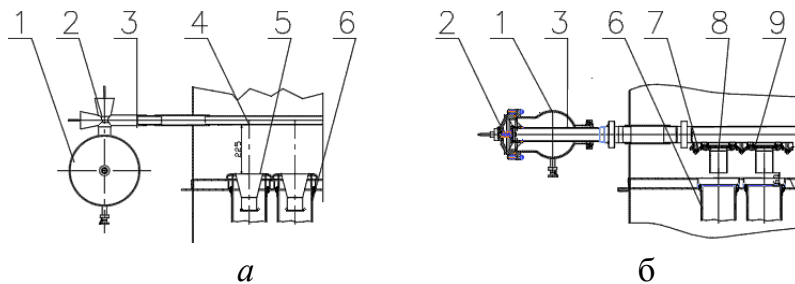


Рис.10. Схема вузла імпульсної регенерації стисненим повітрям:

а – рукавів довжиною до 4 м; б – рукавів довжиною 6 м;

1 – ресивер стисненого повітря; 2 – швидкодіючий імпульсний клапан;

3 – труба подачі повітря; 4 – отвір (сопло); 5 – насадок; 6 – рукав; 7 – прижим;

8 – насадок Коанда; 9 – кільцева щілина виходу струменя

Виконання за рис. 10, а застосовується для рукавів завдовжки до 4 м. Повітря подається отвором з гострими краями в стінці труби. Діаметр отвору становить:

- 7 мм при довжині рукава 2,5 м;
- 10 мм при довжині рукава 4 м.

Система формування струмини повітря містить насадок 5, який постачається комплектно з каркасом рукава.

Вузол за рис. 10, б дозволяє при односторонньому подаванні повітря виконувати регенерування рукавів завдовжки 6 м. Його особливістю є застосування спеціального насадка з ефектом Коанда, а також швидкодіючого імпульсного клапана з високою пропускною здатністю. Насадок притискується до повітряної труби двома патрубками, через які повітря заходить в розподільчу камеру і вузькою кільцевою щілиною спрямовується горизонтально в середину насадка. Нижній край щілини закруглено вздовж радіусу. Завдяки настиланню струмини на закруглення (ефект Коанда) напрямок струмини змінюється з горизонтального на вертикальний донизу, чим забезпечується ефективна ударна хвиля вздовж усього рукава.

Методика розрахунку рівноважного опору в процесі імпульсного регенерування фільтра за даними експлуатаційних випробувань. Розглянуто результати роботи рукавного фільтра сушильної установки продуктивністю 900 кг/год випаруваної вологи. Фільтр є другим ступенем після циклона очищення відпрацьованого повітря від молочного порошку з поверненням уловленого продукту в технологічний цикл на пакування.

Параметри дослідів:

- | | |
|---|--------------------------|
| 1. Технічні характеристики фільтра: | |
| • площа фільтрування | 284 м ² ; |
| • кількість рукавів | 140 шт; |
| • навантаження фільтрування | 1,6 м ³ /хв; |
| 2. Витрата повітря на вході в фільтр | 28000 кг/год; |
| 3. Витрата повітря на продуктове дно | 1200 кг/год; |
| 4. Температура повітря | 74° С; |
| 5. Концентрація порошку на вході в циклон | 14 г/м ³ ; |
| 6. Концентрація порошку на вході в фільтр | 1000 мг/м ³ ; |
| 7. Концентрація порошку на виході | 10 мг/м ³ ; |
| 8. Витрата стисненого повітря продування | 200 кг/год. |
| 9. Медіанний діаметр частинок перед циклоном | 38 мкм; |
| 10. Медіанний діаметр перед рукавним фільтром | 18 мкм; |
| 11. Стандартне відхилення частинок σ | 1,32 мк |

Традиційно цикл роботи фільтра складається з періоду перероблення одноразової партії сухого молочного продукту, миття фільтра, сушіння рукавів і готовності до наступного робочого циклу. У даному випадку робота ведеться із зупиненням на миття після кількох робочих періодів. Циклограму роботи

фільтра протягом 12 діб (11 періодів роботи) представлено нижче на рис. 11. Даний аналіз обмежено першим періодом роботи (20.08 2025).

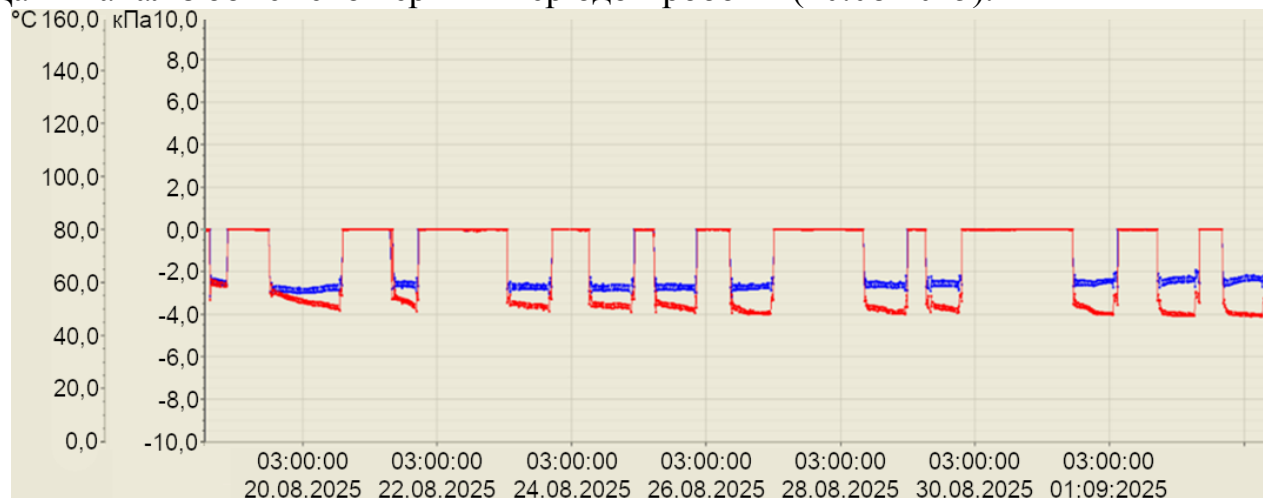


Рис.11. Діаграма зміни перепаду тиску під час експлуатації рукавного фільтра

На діаграмі відображені робочі ділянки з лінією розрідження на вході в фільтр (після очищення повітря в циклонах) і на виході з фільтра, а також горизонтальні ділянки атмосферного тиску, коли обладнання не працює. Різниця між нижньою і верхньою лініями є аеродинамічним опором фільтра.

Перша коротка ділянка є підготовчою – остаточне сушіння фільтра теплим повітрям. Тканина після прання й сушіння має незначний опір, розрідження на вході і виході фільтра майже однакові.

За першого робочого періоду при малому питомому запиленні тканини імпульсне очищення забезпечує незначне вивантаження, здійснюється накопичення пилового шару на тканині. Баланс надходження та вивантаження пилу системою імпульсного очищення досягається після 15...20 годин роботи після набирання рівноважного питомого запилення полотна. Цей період є періодом рівноважного опору та базовим для аеродинамічного розрахунку.

При продовженні роботи без прання рукавів у подальших робочих періодах баланс надходження й вивантаження пилу в основному зберігається з певним збільшенням опору за рахунок гігроскопічного зволоження залишків порошку на тканині.

У методиці розрахунку рівноважного опору фільтра використано дані досліджень [9], наведений вище аналіз фільтрування запиленої тканини, а також дані експлуатування промислового зразка фільтра. Розрахункова формула рівноважного опору має базові параметри роботи дослідного фільтра, а також поправкові множники – відношення фактичного параметра до базового його значення в певному степені. Зокрема рівноважний опір фільтра ΔP , Па:

- прямо пропорційний вхідному запиленню $C_{тил}$, г/м³, у степені 0,25 у діапазоні запиленості 0,1...2,3 г/м³;

- обернено пропорційний квадрату тиску стисненого повітря $P_{нов}$, бар, у межах від 4,15 до 8,3 бар;
- прямо пропорційний квадратному кореню від тривалості паузи між імпульсами T_n , с, в інтервалі від 10 до 60 с;
- прямо пропорційний швидкості фільтрування W_ϕ , м/хв, у квадраті;
- прямо пропорційний відношенню площі сопла f_c , м², до площі рукава $F_{рук}$, м² в першому степені;
- зворотно пропорційний медіанному діаметру частки d_m , мкм, у квадраті.

Базові параметри:

- опір фільтра $\Delta P = 1020$ Па;
- пилове навантаження $C_\phi = 2,3$ г/м³;
- тиск повітря $P_{ст.н} = 6,21$ бар;
- тривалість паузи між імпульсами $T_n = 41$ с;
- швидкість фільтрування $W_\phi = 2,44$ м/хв;
- відношення площі сопла до площі поверхні рукава $f_c/F_{рук} = 50 \cdot 10^{-6}$;
- медіанний діаметр часток пилу $d_m = 38$ мк.

Тоді маємо загальне рівняння, Па:

$$\Delta P = 1020 \cdot \left(\frac{C_{пил}}{2,3} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{6,21}{P_{нов}} \right)^2 \cdot \left(\frac{T_n}{41} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{W_\phi}{2,44} \right)^2 \cdot \frac{f_c / F_{рук}}{50 \cdot 10^{-6}} \cdot \left(\frac{38}{d_m} \right)^2. \quad (11)$$

Розрахунок рівноважного опору фільтрації виконано за формулою (11) при вказаних вище базових параметрах процесу імпульсного очищення для рукавного фільтра з площею фільтрування 284,3 м² з рукавами завдовжки 4 м та витратою повітря 28000 м³/год. Робочі параметри процесу імпульсного очищення становили: швидкість повітря 1,66 м/хв; тиск стисненого повітря 5,7 бар; тривалість паузи між імпульсами 30 с і 70 с, діаметр сопла 10 мм.

Розглянуто два варіанти схеми очищення повітря – фільтр встановлено безпосередньо після сушильної камери з медіанним діаметром частинок $d_m = 38$ мкм (таблиця 1, п. 14) та як другий ступінь після циклонів з медіанним діаметром частинок $d_m = 18$ мк (таблиця 1, перерахунок за пп. 12, 15, 16, 17).

Як змінний параметр прийнято годинне подавання порошку з повітрям – від 2 кг/год до 400 кг/год. При цьому вміст пилу в повітрі змінювався з 0,07 г/м³ до 14,1 г/м³ (від 70 мг/м³ до 14100 мг/м³).

При однаковому вмісті пилу в повітрі на вході до фільтра аеродинамічний опір від зменшення медіанного діаметра частки збільшується в $(38/28)^2 = 4,4$ рази. Для порівняння при збільшенні вмісту пилу у 200 разів опір зростає у $200^{0,25} = 3,7$ рази. Таким чином, у діапазоні роботи рукавного фільтра

після циклонів його аеродинамічний опір практично дорівнює опору фільтра, розташованого після сушильної камери. Більший вміст пилу в повітрі компенсується більш ефективним вивантаженням і пониженим опором шару частинок більшого медіанного діаметра. На рис. 12 опір фільтра після циклонів в кінці першого періоду роботи досягає 1000 Па і в кінці останнього – 1500 Па. При одноступеневій схемі типовий робочий діапазон опору фільтра становить 1000 Па...1500 Па.

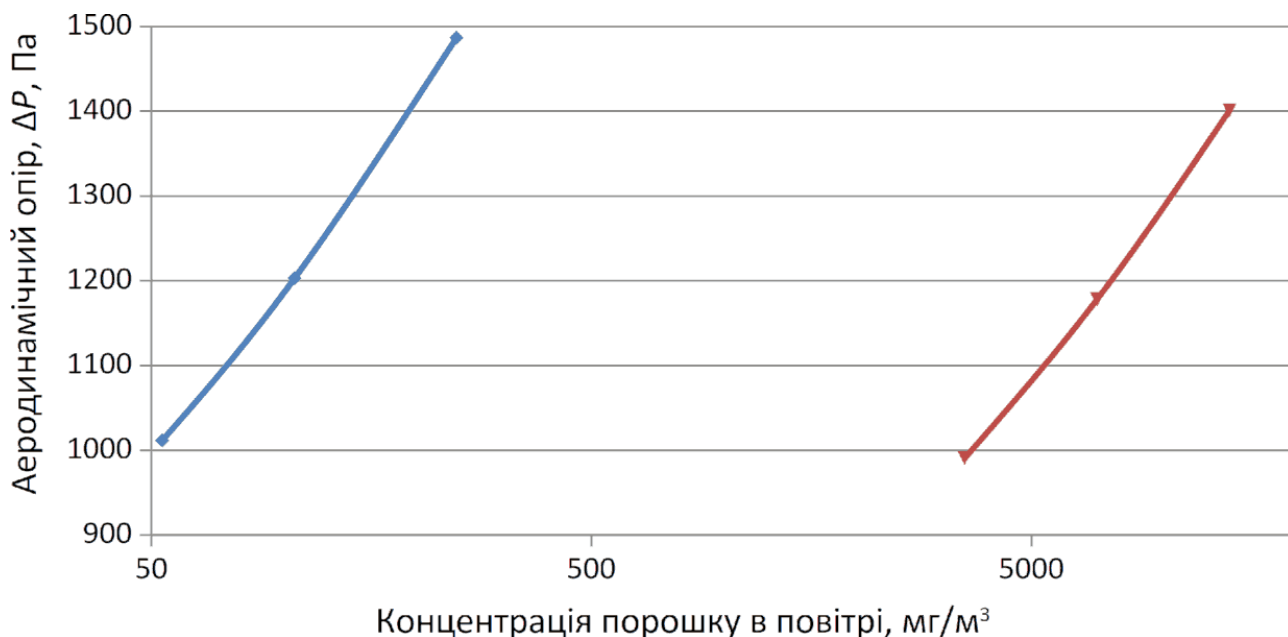


Рис.12. Аеродинамічний опір рукавного фільтра залежно від концентрації пилу в повітрі.

- ромб — у двоступеневій схемі – після циклона ($d_m = 18$ мк);
- ▼ — в одноступеневій схемі – після сушильної камери ($d_m = 38$ мк)

За результатами досліджень розроблено, виготовлено та введено в експлуатацію дев'ять рукавних фільтрів санітарного виконання, зокрема з автоматизованими технологічними процесами фільтрування, імпульсного регенерування, прання та сушіння, для сушильних розпилювальних установок продуктивністю від 500 до 2500 кг/год випаруваної води.

Висновки. Розпилювальні сушильні установки для виробництва сухого молока з циклонним очищенням відпрацьованого повітря не забезпечують наявні нормативи викидів твердих частинок до атмосфери. Необхідну ефективність очищення повітря від дрібнодисперсного пилу забезпечують рукавні фільтри. Наявні рекомендації щодо проектування рукавних фільтрів стосуються вловлювання промислового пилу і не враховують властивості сухих молочних порошків, а також санітарних вимог до харчового обладнання. Дослідження процесів фільтрування повітря в чистому фільтрувальному

полотні а також у запиленому полотні на лабораторних моделях і зразках промислових повнорозмірних рукавів показали, що рух повітря в чистому полотні а також шарі частинок сухого молока підлягає закону Дарсі і є фільтрацією в пористих середовищах при ламінарному режимі. Перепад тиску повітря пропорційний швидкості фільтрування. Коефіцієнт опору – відношення перепаду тиску в Па до швидкості повітря в м/хв – є константою, що залежить від типу й стану чистого полотна та його питомої запиленості в г/м² і становить 15...20 Па/(м/хв) для чистого полотна і до 1000 Па/(м/хв) для запиленого. Запилення рукава має верхню межу, при досягненні якої опір стабілізується і пил спадає під дією власної ваги. При імпульсному струшуванні після удару перепад тиску спочатку зменшується, а потім під час паузи частково відновлюється за рахунок повернення назад частини скинутого пилу. Встановлено, що при однаковому питомому запиленні полотна аеродинамічний опір порошку після його очищення в циклонах (медіанний діаметр $d_m = 18$ мкм) збільшується порівняно з порошком на виході з сушильної камери ($d_m = 38$ мкм) пропорційно квадрату оберненого відношення медіанних діаметрів частинок. Аналіз експлуатації рукавного фільтра площею 284 м² на підставі циклограми його роботи протягом 12 діб показав, що баланс надходження та вивантаження пилу системою імпульсного очищення досягається після 15...20 годин роботи. При продовженні роботи без прання баланс надходження й вивантаження пилу в основному зберігається з певним збільшенням опору за рахунок гігроскопічного зволоження залишків порошку на тканині. Розроблена методика дозволяє розрахувати необхідний коефіцієнт вивантаження порошку (який повинна забезпечить система імпульсного очищення) з урахуванням матеріального балансу запилення, аеродинамічного опору запиленого полотна та медіанного розміру частинок. Показано, що при одній і тій же площі рукавний фільтр працює з однаковою ефективністю безпосередньо за сушильною камерою і після циклонів. Висновок підтверджується експлуатаційними даними. Розроблена методика дозволяє розрахувати рівноважний опір рукавного фільтра з урахуванням параметрів імпульсного очищення, що враховує навантаження за швидкістю фільтрування, запиленість, фракційний склад, частоту імпульсів, тиск стисненого повітря та діаметр сопла. За результатами досліджень розроблено, виготовлено і введено в експлуатацію дев'ять рукавних фільтрів санітарного виконання, зокрема з автоматизованими технологічними процесами фільтрації, імпульсної регенерації, прання та сушіння, для сушильних розпилювальних установок продуктивністю від 500 до 2500 кг/год випаруваної вологи.

References

1. Makarov A.S., Khodos A.I., Kiriienko M.O., Senchuk M.P. "Energy-efficient vacuum evaporation units for concentration in the dairy industry". *Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplofazopostachannia*, Iss. 43, 2022, pp. 13-26. Available at: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2022.43.13-26> (in Ukrainian)
2. Makarov A.S., Senchuk M.P., Khodos A.I., Kirienko M.O. "Improving the efficiency and reliability of the spraying units for drying dairy products". *Ventyliatsiia, osvittlennia ta teplofazopostachannia*, Iss. 51, 2025, pp. 6-33. Available at: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.51.6-33> (in Ukrainian)
3. *Tekhnicheskaia entsiklopediia*. OHIZ, tom 22, 1933.
4. Grishin M.A., Atanatsevich V.I., Semenov Yu. G. *Ustanovki dlia sushki pishchevykh produktov*. VO «Ahropromizdat», 1989, pp. 139-141.
5. Ratushniak H.S., Lialiuk O.H. *Zasoby ochyshchennia hazovykh vykydiv*, Universum-Vinnizia, 2008. Available at: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/6972> (in Ukrainian)
6. Kouzov P.A et al. *Ochistka gazov i vozdukha ot pyli v khimicheskoi promyshlennosti*, Himiia. 1993.
7. Vahi Vesterhaard. *Tekhnologiiia proizvodstva sukhogo moloka*. Vyparivanie i raspylitelnaia sushka, Niro A/S, 2003.
8. Burykin A.I. "Metodolohichni osnovi znizhennia vtrat sukhoho moloka pry rozpiliuvalnjmu sushinni". *Molochna promislovist*, No 12, 2004, pp. 66-69. (in Ukrainian)
9. Dennis R., Silverman L. "Fabric Filter Cleaning by intermittent reverse air pulse", *ASHRAE Journal*, Vol. 4, No 3, 1962.
10. Zinherman Yu.YE., Trembach T.F., Kameniuka V.B. "Bezpylevaia vydacha koksa na batareiakh koksokhimicheskikh predpriatii". *Ekologia i promyshlennost*, No 2, 2005, pp. 53-55. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekolprom_2005_2_13
11. Leha Yu.H., Mysliuk O.O., Korneliuk N.M. "Shliakhy pokrashchennia ochyshchennia dymovykh haziv teploelektrostantsii". *Ekolohichna bezpeka*, No1, 2008, pp. 42-50. Available at: [https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2008_1\(1\)/42.pdf](https://www.kdu.edu.ua/EKB_jurnal/2008_1(1)/42.pdf) (in Ukrainian)
12. Rusanov A.A. *Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniiu*. Enerhoatomizdat, 1983.
13. Loitsianskii L.H. *Mekhanika zhydkosti i gaza*. Nauka, 1970.
14. Kharitonov V.D., Khomiakov V.D. "Ulavlivanie SOM iz otrabotannogo sushilnogo agenta". *Molochnaia promishlennost*, No. 3, 2003, pp. 37-38.
15. Fedorov I.M. "Koefitsienty ispareniiia, teplootdachi i soprotivlenie pri sushke zernistykh materialov s produvkoi vozdukha cherez sloi". *Trudy sushilnoi laboratorii VTI*, Iss. II, 1941, pp. 64-185.

16. Lazarev V.A. “Metod opredeleniia aerodinamicheskikh pokazatelei tsiklonov po geometricheskim parametram ikh vkhodnykh i vykhodnykh patrubkov” Khimicheskoe i neftianoe mashinostroenie, No 6, 2006, pp.37–39.
17. Frokov K.V. Entsyklopediia mashinostroeniia. Tom IV-12. Mashiny i apparaty khimicheskikh i neftekhimicheskikh proizvodstv. Mashinostroenie, 2004
18. Malin A.D. “Ekspluatatsionnye kharakteristiki rukavnykh filtrov s impulsnoi produvkoi”. Promyshlennaia i sanitarnaia ochistka gazov, No. 1, 1980, pp. 7-8.
19. Bubnov V.N., Malihin A.D. “Rezultaty ispytaniia filtra s dvustoronnei impulsnoi produvkoi” Promyshlennaia i sanitarnaia ochistka gazov, No.2, 1978, pp. 2-3.
20. Boriskina M.A., Lasik Yu.A., Lemberg V.N. “Issledovaniie vsasyvaiushchego filtra s pulsiruiushchei ezhektornoii produvkoi”. Trudy VNIIEKIPRODMASH, Iss. 21/5, 1970.

UDC 663.18

PhD, SRF. **Anatolii Makarov**,

makarov.anatoly@kmbp.com.ua, ORCID: 0000-0002-7338-2906

PrJSC «Kalynivskyi Machine Building Plant»

PhD, Assoc. Prof. **Mykhailo Senchuk**,

smp_21@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8968-7336

Kyiv National University of Construction and Architecture

Eng. **Andrii Khodos**,

khodos@kmbp.com.ua, ORCID: 0009-0000-2198-2208

Eng. **Mykhailo Kyrienko**,

mi hail_kirienko@ukr.net , ORCID: 0009-0008-5396-8644

PrJSC «Kalynivskyi Machine Building Plant»

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.54.94-121>

IMPROVEMENT OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR THE OPERATION OF BAG FILTERS FOR SPRAYING DRYING INSTALLATIONS

***Abstract.** The current state of equipment operation for concentrating and drying dairy products, research and calculation methods for the purification of exhaust air from spray drying installations, dusted with milk powder, in bag fabric filters, in particular the filtration and pulse regeneration processes, have been analyzed. It is noted that known studies of bag filters do not contain sufficient information to substantiate the design of a filter for cleaning air from milk powder while ensuring modern environmental requirements. Taking into account the obtained data of*

experimental studies of filtration processes on laboratory models and full-size stands, conducted at PrJSC "Kalynivka Machine-Building Plant" (Kalynivka, Vinnytsia region), the directions of increasing the efficiency and reliability of the use of bag filters for spray drying plants are considered. Methods for calculating the aerodynamic resistance of the filter cloth – clean and dusty – and determining the equilibrium resistance of the bag filter in the process of pulse regeneration of the filter, which takes into account the load on the filtration speed, dustiness, fractional composition, compressed air pressure and pulse frequency, are proposed. A comparative calculation analysis of aerodynamic resistance was performed when using bag filters according to a single-stage cleaning scheme (directly after the drying chamber) and as a second stage of cleaning (after cyclones). It showed that in the range of their effective operation, the aerodynamic resistance in both cases is practically the same with a significant reduction in the specific dusting of fine powder in the exhaust air, which allows to ensure modern environmental indicators for harmful emissions. The effectiveness of the implemented technical solutions in industrial samples of bag filters was confirmed by the results of commissioning tests of industrial samples and during their further operation. Based on the acquired scientific and technical experience, PrJSC "Kalynivka Machine-Building Plant" (Kalynivka, Vinnytsia region) developed, manufactured and put into operation nine sets of bag filters for drying plants with a capacity of 500 to 2500 kg/h of evaporated moisture.

Keywords: *baghouse, bag filter, dry dairy products, air cleaning, milk powder, filtration, pulse regeneration.*

Received/Надійшла до редакції	20.11.2025
Reviewed/Рецензована	27.11.2025
Accepted/Прийнята	05.12.2025