

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ГІДРОАЕРОМЕХАНІКИ І
МЕХАНОТРОНІКИ

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ О.Ф. Луговський
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ___ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 131 Прикладна механіка
(код і назва спеціальності)

на тему: Промислове осушення повітря за допомогою ультразвукових кавітаторів

Виконала : студентка 6 курсу, групи МА-61м
(шифр групи)

_____ Дудка Єлизавета Юріївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник Ковальов В.А. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

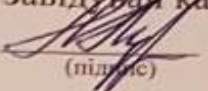
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень «магістр»
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 О. Ф. Луговський
(підпис) (ініціали, прізвище)

«__» _____ 2017 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту
Дудка Єлизавета Юріївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Промислове осушення повітря за допомогою
ультразвукових кавітаторів

науковий керівник дисертації

д.т.н., проф. Ковальов В.А.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «15» березня 2018 р. № 934-с

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процес осушення вологого
повітря в камері

4. Предмет дослідження вероятнісні механізми ультра-
звукового осушення повітря

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 5.1. Аналітичний опис
режими методів і конструкції для осушення 5.2. Математичне
розроблення конструкції камери осушення 5.3. Математичне моделювання
процесу осушення 5.4. Теоретичне дослідження особливостей
механізму осушення 5.4. Теоретичне дослідження роботи
ультразвукового кавітатора

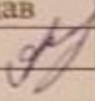
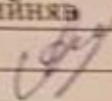
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу 9 таблиць:

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ; ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ; ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ; ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ; ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

ДП02 МАБ1МДЗ.0500.00; ДП02 МАБ1МДЗ.0700.00; ДП02 МАБ1МДЗ.0800.00; ДП02 МАБ1МДЗ.0900.00

7. Орієнтовний перелік публікацій Аналіз економічних особливостей машинобудівних підприємств, зокрема, щодо умовностей системи організації виробництва та обслуговування у виробничих сферах

8. Консультанти розділів дисертації

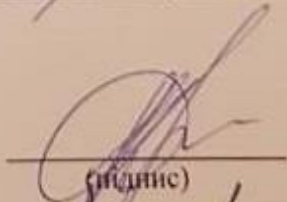
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Ковтун А.І., асистент		

9. Дата видачі завдання 02.09.16 року

Календарний план

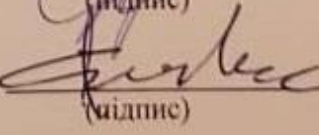
№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз існуючих видів організації в машинобудівній	з 02.09.16 по 18.11.16	виконано
2.	Аналіз існуючих видів умовностей та умовностей у роботі	з 18.11.16 по 02.03.17	виконано
3.	Аналіз математичної моделі розрахунку роботи циклону	з 02.03.17 по 31.05.17	виконано
4.	Розробка та розробка нової структури циклону. Розрахунок координат	з 31.05.17 по 02.09.17	виконано
5.	Моделирование циклону поперечного типу при різних властивостях	з 02.09.17 по 17.10.17	виконано
6.	Проведення експериментальних досліджень впливу умовностей на роботу циклону	з 17.10.17 по 02.02.18	виконано

Студент


(підпис)

Дурка Є.Ю.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації


(підпис)

В.А. Ковалов
(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

У магістерській дисертації розглянуто створення ефективного пристрою для осушування вологого промислового повітря у фільтрувальних системах за рахунок використання ультразвукового кавітаційного генератора.

У розділі 1 проаналізовано конструктивні та технологічні особливості циклонів, розглянуті існуючі методи осушення їх принцип роботи. В основу аналізу циклонів покладено роботу авторів Ужова В. Н., О. Н. Русака, В. В. Милохова, Зайцева Н.О. в роботах «Очистка промышленных газов электрофильтрами», «Борьба с пылью на деревообрабатывающих предприятиях» та «Оборудование для очистки газов от пыли. Циклоны.». Для проведення аналізу видів та принципів роботи промислових осушувачів було розглянуто статті компаній «Desiccant Technologies Group Україна», «Dantherm» , «ARIACOM» .

У розділі 2 проведені розрахунок циклону та ультразвукового кавітатора на основі роботи Дорундяк Л.М. «тема» та патенту «Пристрій для кавітаційної обробки рідини» Луговського О.Ф., Гришко І.А., Мовчанюка А.В.

У розділі 3, спираючись на отримані результати досліджень Дорундяк Л.М., було проаналізовано моделювання циклону ЦН-15. Проведено моделювання цього самого циклону, але вже за різних характеристик потоку повітря.

У розділі 4 було розроблено СТАРТАП – ПРОЕКТ для визначення основних перспектив впровадження його на ринок та потенційних напрямків його застосування

В розділі 5 проаналізовано шкідливі і небезпечні фактори та визначено відповідні заходи безпеки.

Дипломний проект містить пояснювальну записку обсягом 116 сторінки та 9 аркушів графічної частини.

Ключові слова:

Осушення, очищення, ультразвуковий кавітатор, циклон, гідравлічний опір, моделювання циклону, ультразвукове поле, рух повітря.

ABSTRACT

In the master's dissertation the creation of an effective device for drying of wet industrial air in filter systems is considered through the use of an ultrasonic cavitation generator.

In Section 1 the structural and technological features of the cyclones are analyzed, the existing methods of drainage are considered, their principle of work. The basis of the analysis of cyclones is the work of the authors Uzhova A.V, O.N. Rusak, V.V. Milohova, Zaitseva N.O. in works "Cleaning industrial gases by electronic filters", "Fighting dust in woodworking enterprises" and "Equipment for cleaning gases from dust. Cyclones. ". For analysis of the types and principles of work of industrial dehumidifiers, the articles of the companies «Desiccant Technologies Group Ukraine», «Dantherm», «ARIACOM» were considered.

In section 2, the calculation of the cyclone and ultrasonic cavitator based on the work of Dorondiak L.M. "Theme" and patent "Device for cavitation treatment of liquids" Lugovsky O.F., Grishko I.A., Movchanyuk A.V.

In Section 3, based on the results of the research, Dornundak L.M, the simulation of the cyclone of the CN-15 was analyzed. The simulation of this very cyclone, but already for different characteristics of the air flow.

Section 4 developed the STARTUP PROJECT to determine the main prospects for its introduction into the market and potential directions for its application.

Section 5 analyzes harmful and hazardous factors and identifies the appropriate security measures.

The diploma project contains an explanatory note of 116 pages and 9 pages of the graphic part.

Keywords:

Dehumidification, purification, ultrasonic cavitator, cyclone, hydraulic resistance, cyclone modeling, ultrasonic field, air flow.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ І ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ТА ОСУШУВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПОВІТРЯ.....	11
1.1. Метод циклонування запиленого повітря.....	11
1.2. Основні характеристики циклону.....	16
1.3. Особливості циклонів типу ЦН.....	17
1.4. Математичні моделі циклону.....	18
1.5. Промислові осушувачі повітря.....	23
1.6. Методи осушення повітря.....	24
1.7. Осушення на основі адсорбенту.....	29
1.8. Осушення на основі рефрижераторного осушувача.....	30
1.9. Осушення абсорбційного типу в порівнянні з осушенням, заснованим на охолодженні.....	31
1.10. Висновки.....	33
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ, РОЗРАХУНОК ЦИКЛОНУ ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВІТАТОРА.....	34
2.1. Методика теоретичного дослідження.....	35
2.2. Математичне моделювання руху повітря у циклоні.....	37
2.3. Розрахунок циклону.....	56
2.4. Розрахунок ультразвукового кавітатора.....	59
2.5. Висновки.....	73
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЦИКЛОНІВ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	74
3.1. Результати досліджень руху повітря за нормальних умов.....	75
3.2. Результати досліджень руху повітря при підвищеній вологості повітря.....	79
3.3. Висновки.....	92
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ.....	92

4.1. Опис ідеї проекту	93
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту	93
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	94
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	100
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	102
4.6. Висновки	104
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	105
5.1. Повітря робочої зони	106
5.2. Виробниче освітлення	107
5.3. Електробезпека	108
5.4. Виробничий шум та вібрація	112
5.5. Засоби індивідуального захисту при роботі з УЗ обладнанням	113
5.6. Пожежобезпека	113
5.7 Висновок	114
ВИСНОВОК.....	115
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	116

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- Q – продуктивність циклона, $m^3 / год$;
- η – ефективність циклона, %;
- Δp – втрати тиску на гідравлічному опорі (гідравлічний опір циклона), $Па$;
- p – статичний тиск;
- G_{ex} і $G_{вих}$ – відповідно кількість пилу на вході і на виході з циклона, m^3 ;
- m – маса частинки, $кг$;
- r_c – радіус частинки пилу, m .
- d_c – діаметр частинки пилу, m ;
- V_τ – тангенціальна складова швидкості потоку, m/c .
- V_r – радіальна складова швидкості потоку, тобто швидкість сепарації, m/c ;
- V_o – осьова швидкість потоку, m/c ;
- ω – кутова швидкість потоку, c^{-1}
- μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, $Па \cdot c$;
- τ – час релаксації частинки, c ;
- t_c – час, за який частинка, що потрапила в апарат, пройде шлях до стінки зовнішнього циліндра, c .
- C_o – концентрація пилу, $мг/м^3$;
- t – час проведення експерименту, $хв$;
- t_c – критерій Стюдента;
- T – абсолютна температура, $^{\circ}C$;
- D – діаметр циклона, $мм$;
- H_u – висота циліндричної частини циклона, $мм$;
- H_k – висота конічної частини циклона, $мм$;
- H_v – відстань від нижнього краю вихлопної труби циклона до початку його конічної частини, $мм$;
- H – загальна висота циклона, $мм$;
- d – діаметр вихлопної труби, $мм$;
- h_z – глибина занурення вихлопної труби, $мм$;
- h_t – довжина вихлопної труби;
- d_o – діаметр пиловипускного отвору, $мм$;

d_1 – діаметр бункера, мм;

H_b – висота бункера, мм;

α – кут нахилу кришки і вхідного патрубку циклона, °;

d_ϕ – діаметр фільтрувального рукава, мм;

H_ϕ – висота фільтрувального рукава, мм;

q – частка повітря, що припадає на фільтрацію, %;

a – висота вхідного патрубку циклона, мм;

b – ширина вхідного патрубку циклона, мм;

l – довжини вхідного патрубку циклона, мм;

f – частота коливань генератора збудження;

U – подовжнє переміщення;

C – швидкість звуку;

S – площа поперечного перерізу;

I – осьовий момент інерції поперечного перерізу кільця;

ρ – щільність матеріалу кільця;

i – число півхвиль, розташованих по довжині кола кільця.

ВСТУП

Останнім часом спостерігається висока інтенсифікація промислового виробництва, зокрема складних технологічних процесів, пов'язаних з активним використанням навколишнього середовища. Як відомо, у гідроаеромеханіці повітря є досить поширеним робочим тілом у багатьох пристроях та системах пневматики, де стиснене повітря може виконувати силові функції, переміщуючи вантажі, регулюючи системи керування тощо. Крім того, повітря є середовищем для пересування різноманітних літальних апаратів – літаків, ракет, гелікоптерів и т.д.

Усі технологічні процеси, пов'язані з використанням повітря, є досить важливими з точки зору його прикінцевого очищення від шкідливих викидів, продуктів переробки, промислового пилу та інших побічних часток речовини. Це важливо у першу чергу для збереження здоров'я персоналу, а також для дотримання високих технологічних вимог для виробництва сучасної прецизійної продукції, де точність виготовлення виробів суттєво залежить від чистоти повітря.

Як відомо, повітря належить до класу стисливих рідин, щільність яких суттєво залежить від температури, зростаючи при низьких температурах та зменшуючись при високих. Така залежність є визначальною при розрахунках в авіаційній галузі швидкостей

руху об'єктів, величин підйомної сили та лобового опору та інших аеродинамічних параметрів.

Крім зазначених галузей промисловості, у машинобудуванні, хімічній, деревообробній та інших галузях дуже актуальними представляються аеродинамічні методи очищення повітря від шкідливих речовин, наприклад, газів, твердих домішок, деревного пилу, шлаків тощо. Серед таких методів дуже поширеними вважаються різноманітні фільтри, сепаратори та інші подібні пристрої, що використовують такі аеродинамічні ефекти як відцентрове циклонування, лабіринтне осадження, ультразвукове зневоднення. Подібні методи очищення є досить ефективними, але для збільшення їх ефективності часто вони потребують точних розрахунків та глибокого експериментального дослідження.

Наприклад, ефективність очищення повітря суттєво залежить від його вологості, коли частки пилу чи інших речовин, маючи різну масу отримують різні траєкторії руху, значно зменшуючи коефіцієнт корисної дії агрегату. Крім того, налипання вологих часток на стінки фільтрів теж вважається шкідливим явищем через необхідність їх видалення або періодичного очищення тощо.

Метою поданої дисертації є створення ефективного пристрою для осушування вологого промислового повітря у фільтрувальних системах за рахунок використання ультразвукового кавітаційного генератора. Для досягнення запропонованої мети роботи потрібно розв'язати наступні задачі:

1. Провести аналітичний огляд існуючих методів та конструкцій для очищення та осушення повітря;
2. Провести проектування ефективного фільтра-сепаратора з урахуванням методів осушення виробничого повітря від шкідливих домішок.
3. Провести аналіз аеродинамічних особливостей роботи фільтрів циклонного типу з використанням ультразвукових генераторів для визначення оптимальних режимів їх роботи,
4. Промодельовати аеродинамічний механізм роботи циклонного фільтра з ультразвуковим генератором та порівняти з існуючими конструкціями осушувачів.
5. Експериментально перевірити працездатність та ефективність роботи запропонованого пристрою, а також зробити практичні висновки щодо доцільності застосування у промисловості.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ І ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ТА ОСУШУВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПОВІТРЯ

Як зазначалося, великий діапазон методів та пристроїв для фільтрування та осушення повітря спричинений необхідністю їх пристосування до різних виробничих умов, технологічних вимог, а також для забезпечення необхідної продуктивності роботи при різноманітних режимах експлуатації і жорстких екологічних вимог.

1.1. Метод циклонування запиленого повітря

Одним з поширених методів очищення/осушення повітря вважають циклонування, тобто використання штучно закручених повітряних потоків, за умов дії відцентрових сил інерції, які відкидають більш важкі за масою частки на периферію потоку, забезпечуючи таким чином очищення та зневоднення вихідного повітря (рис.1.1). В основу аналізу даного типу обладнання покладено роботу авторів Ужова В. Н., О. Н. Русака, В. В. Милохова, Зайцева Н.О. [5, 9, 14].

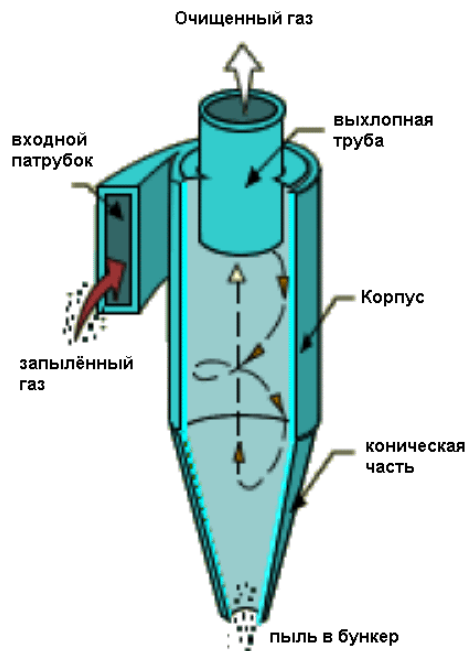
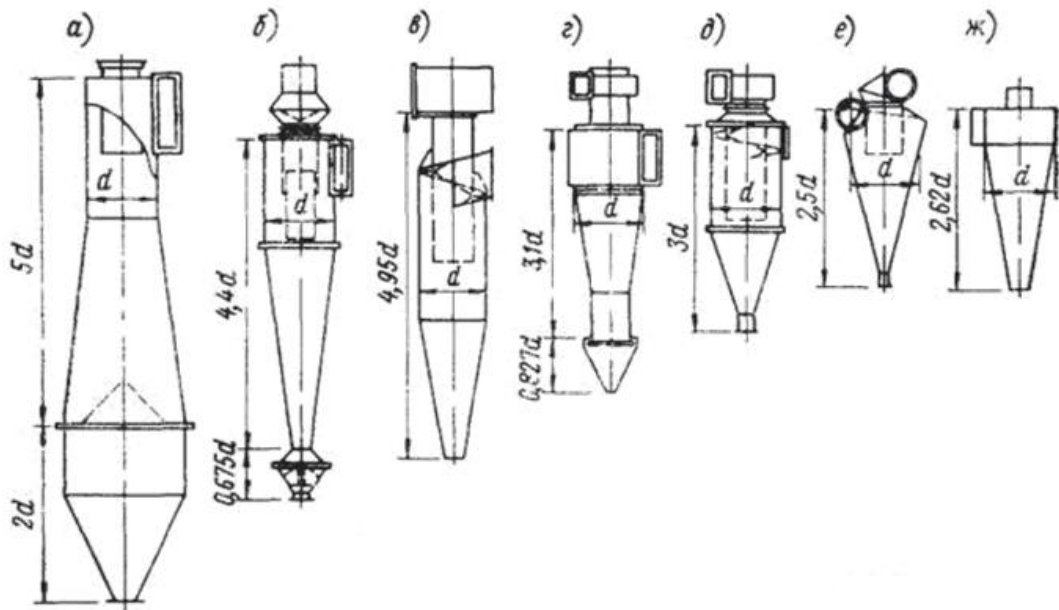


Рис. 1.1. Принципова схема роботи циклона

Пристрій типу «циклон» є широко вживаним у деревообробній промисловості через простоту та надійність конструкції, ефективність роботи як у виробничих режимах, так і у режимі очищення. Тверді частки, пил тощо накопичуються у нижньому бункері та не заважають подальшій роботі агрегату. Аеродинамічний механізм роботи циклона забезпечує досить високу ступінь очищення та осушення повітря і дозволяє маніпулювати габаритними розмірами – діаметром циліндричної та конічної частин, довжини вхідного та вихідного - патрубків – для виконання певних виробничих умов експлуатації.

Вже десятки років на промислових підприємствах різних напрямків галузей циклони є невідмінним атрибутом [3, 4]. Серед пристроїв для очищення повітря на підприємствах вони були найбільш розповсюджені [3, 4] і використовувалися у всіх типах



аспіраційних систем.

Рис.1.2. Моделі циклонів:

а – МІОТ; б – ГДПЦ; в – ЦН-15; г – Файфеля; д – ЛІОТ; е – СІОТ; ж – СДК-ЦН-33.

Циклони широко застосовуються для очищення від пилу технологічних викидів у всіх галузях промисловості. Їх широке поширення обумовлено простотою конструкції циклону, надійністю в експлуатації, і невеликих капітальних і експлуатаційних витратах. До недоліків циклонів слід віднести малу ефективність в області фракцій пилу розміром 5 - 10 мкм. Тому циклони, в основному, використовують для грубої і середньої очищення повітря [5]. Існують різні моделі циклонів (Рис.1.2.)

Принцип роботи циклона ґрунтується на використанні дії відцентрової сили, яка діє на частинки пилу, при обертально-поступальному русі [5].

Основними компонентами циклона (рис. 1.3) є вхідний патрубок 1, циліндрична частина 2, конічна частина 3 і вихлопна труба 4. Запилене повітря, потрапляючи в циклон, здійснює обертаний рух між поверхнею корпусу циклона і вихлопною трубою. Одночасно з обертаним, потік здійснює поступальний рух до конусної частини циклона. Аеродинамічні сили викривляють траєкторію пилових частинок. Під дією відцентрових сил важкі частинки пилу притискаються до внутрішньої поверхні корпусу і, продовжуючи обертатися навколо осі циклона, рухаються до бункера [5].

У конічній частині очищений від пилу потік повітря створює внутрішній вихор, який змінює напрям свого руху на 180 градусів, підіймається вгору і крізь вихлопну трубу виходить в атмосферу. Вловлений пил потрапляє у бункер, який герметично з'єднаний з корпусом циклона [5].

Очищене повітря відводиться крізь вихлопну трубу. Ефективність циклонів залежить від співвідношення геометричних розмірів, режиму руху повітря крізь циклон та фізико-механічних характеристик повітря (швидкості, густини, температури) [5].

Ефективності циклонів різних марок представлені в наступній діаграмі (рис. 1.3) [6]. Циклони зазвичай ділять на циклони великої продуктивності і високої ефективності. Перші мають, зазвичай, великий діаметр забезпечують очистку великих кількостей повітря, другі - невеликий діаметр (до 600 мм.). Часто застосовують паралельну групову установку цих циклонів. Корпус циклону складається з конічної і циліндричної частин (Рис.1.3). За формою циклони діляться на циліндричні ($H_{ц} > H_{к}$) і конічні ($H_{ц} < H_{к}$). $H_{ц}$ і $H_{к}$ - висота циліндричної і конічної частини циклона відповідно. Запилене повітря подається в циклон через патрубок, а очищений - виходить через вихлопну трубу. Застосовують праві (напрямок потоку повітря - за годинниковою стрілкою якщо дивитися зверху) і ліві (напрямок потоку повітря - проти годинникової стрілки якщо дивитися зверху) циклони [7].

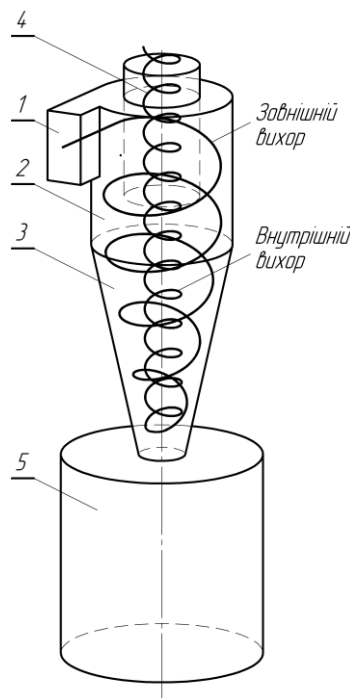


Рис. 1.3 – Загальний вигляд циклона

1 – вхідний патрубок; 2 – циліндрична частина; 3 – конічна частина;
4 – вихлопний патрубок; 5 – бункер

Залежно від способу підведення повітря до циклону розрізняють циклони з

тангенціальним (Рис.1.4.) і гвинтовим (Рис.1.5.) підведенням. За інших рівних умов циклони з гвинтовим підведенням мають більшу ефективність очищення, ніж циклони з тангенціальним способом підведення повітря.

У загальному випадку циклони можуть ефективно відокремлювати тверді частки пилу та бруду, який є майже сухим тому, що у протилежному випадку виникає ефект його налипання на стінках циліндричної та конічної частин. Таким чином ефективність фільтрування різко знижується і виникає необхідність очищення самого фільтра, що негативно впливає на продуктивність роботи та к.к.д. пристрою.

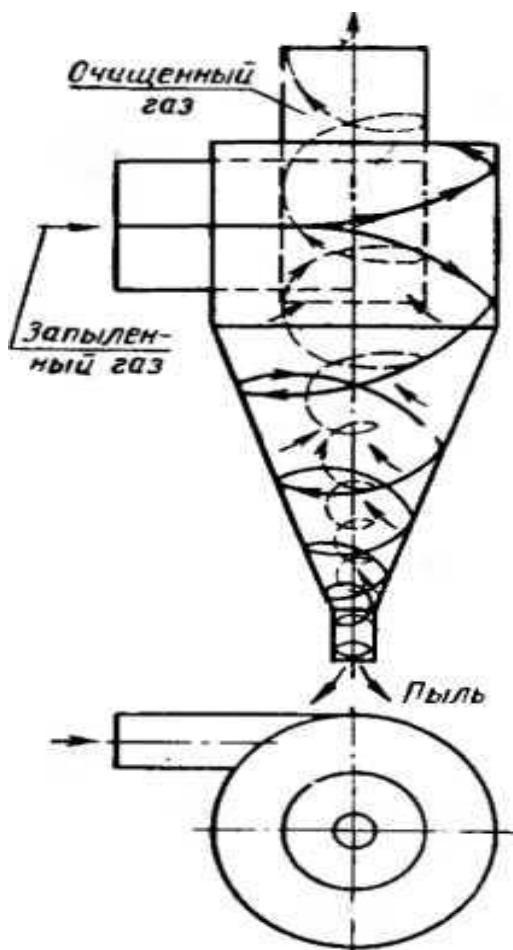


Рис.1.4. Циклон з тангенціальним підведенням повітря

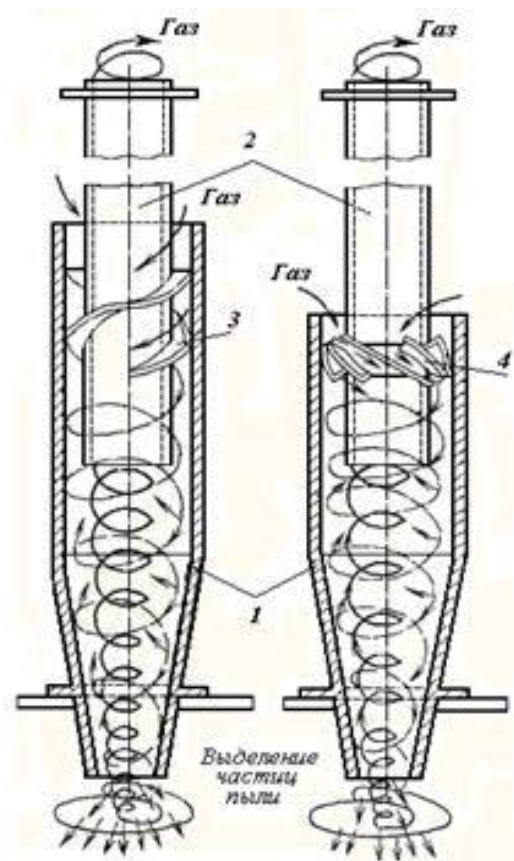
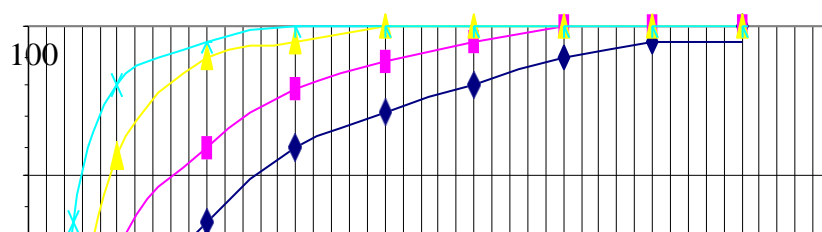
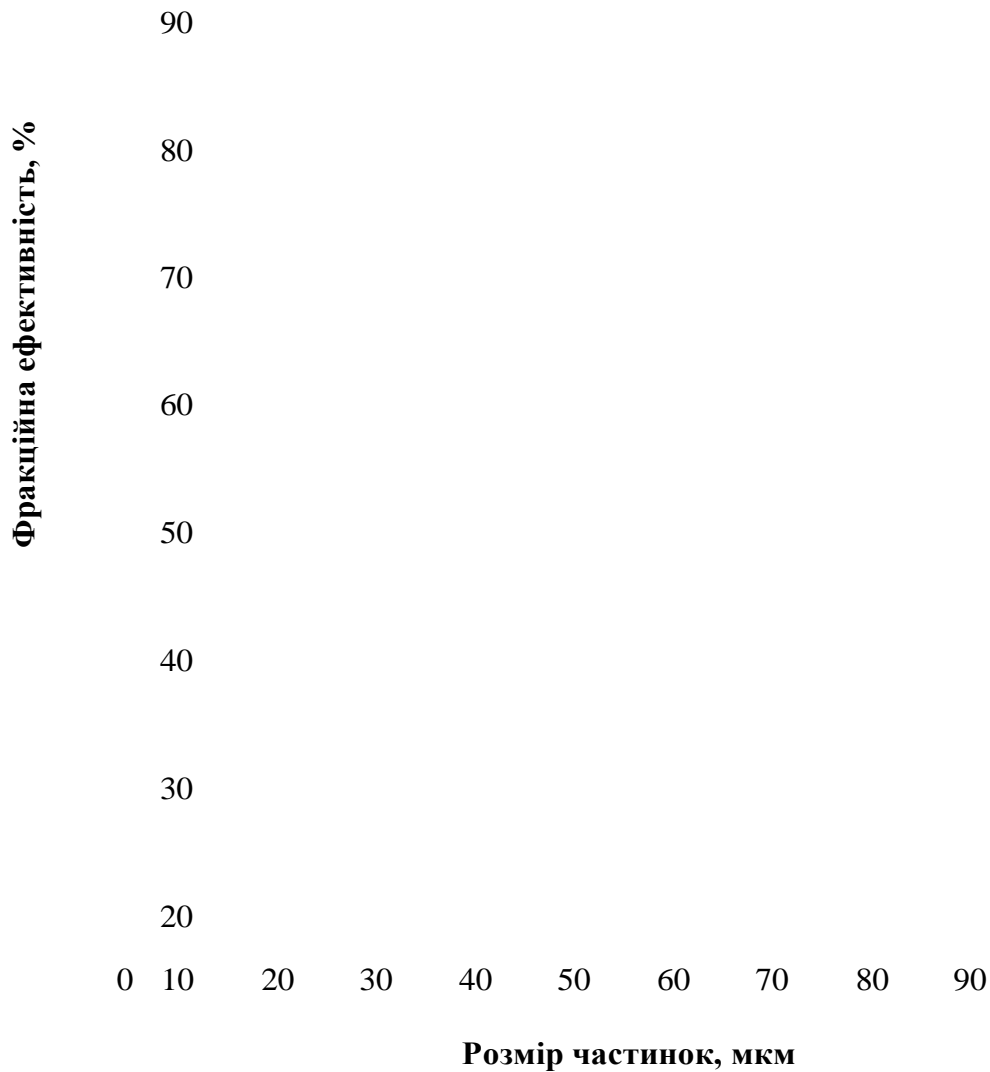


Рис.1.5. Циклон з гвинтовим підведенням повітря





Графік 1.4. Ефективність циклонів різних марок

1.2. Основні характеристики циклону

Основними характеристиками циклона є його втрати тиску на гідравлічному опорі (який надалі називатимемо гідравлічним опором циклона) та коефіцієнт корисної дії (ефективність) [4].

Гідравлічний опір Δp циклона визначено пропорційним різниці повних тисків на його вході та виході. У найбільшій мірі він залежить від швидкості потоку повітря у вхідному патрубку. Для кожної конструкції циклона таку залежність досліджують експериментально. Загальне емпіричне рівняння спаду тиску Δp в циклоні має вигляд:

$$\Delta p = \zeta_c \cdot \rho \cdot \frac{V_i^2}{2}, \quad (1.1)$$

де V_i – швидкість потоку у вхідному патрубку циклона, м/с;

ζ_c – коефіцієнт гідравлічного опору; ρ – густина повітря, кг/м³.

Коефіцієнт гідравлічного опору ζ_c є одним з основних показників, що характеризують енергоємність процесу очищення повітряного потоку в циклоні. Для кожної конструкції сепаратора він визначається експериментальним шляхом. У роботах [8, 9] описують емпіричні рівняння для знаходження ζ_c :

$$\xi = X \cdot \left(\frac{A_i}{D_c^2} \right)^z, \quad (1.2)$$

де X і Z – функції геометрії циклона, A_i , D_c – відповідно площа вхідного патрубку і діаметр вихлопної труби.

Ефективність η процесу очищування пило повітряної суміші визначено як відношення ваги вловленого $G_{ex} - G_{вих}$ до ваги пилу, який надійшов у циклон G_{ex} .

$$\eta = \frac{G_{ex} - G_{вих}}{G_{ex}} \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

де G_{ex} і $G_{вих}$ – відповідно вага пилу на вході і на виході з циклона, кг.

Кожна з конструкцій циклона зорієнтована на конкретні умови його роботи. Існують універсальні циклони (використовуються у великій кількості технологічних процесів) та спеціалізовані (призначені тільки для визначених умов роботи).

1.3. Особливості циклонів типу ЦН

Доволі популярними є циклони НДЮГаз [8, 11]. Серед широко розповсюджених – конструкції ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24. Це високопродуктивні апарати, які забезпечують осідання частинок діаметром 10 мкм з ефективністю не вище 80 %. Найкраще працюють конструкції ЦН-11 та ЦН-15. При однаковій ефективності найбільш високі технічно-економічні показники мають циклони ЦН-11. Циклони типу ЦН-15 мають менші габарити, тому вони є більш стійкими до роботи з липким пилом, тому їхня експлуатація виправдана при очищенні повітря з високою концентрацією дрібнодисперсного або вловлюванні середньо- та сильно липкого пилу. Конструкція циклона ЦН-15 вважається найбільш дослідженою [14, 4].

Окрім вище описаних, існує велика низка циклонів, кожна з яких набувала найбільшого застосування на різних підприємствах у певний період. Проте спільними недоліками відомих конструкцій циклонів є високий коефіцієнт гідравлічного опору та низька ефективність процесу очищення повітря від пилу. Саме цей недолік поряд з підвищенням екологічних вимог до підприємств привели до того, що спочатку циклони

почали використовувати виключно як першу ступінь, двоступеневої системи очищення, перед картриджними фільтрами (рис. 1.6).



Рис. 1.6 – Послідовне підключення циклона та картриджного фільтру:

1 – циклон; 2 – картриджний фільтр

1.4. Математичні моделі циклону

Через те, що немає стандартних методик випробування циклонів та методів розрахунку їхньої ефективності - поширюється застосування не найкращих конструкцій апаратів. Тому створення математичної моделі процесу очищення повітря у циклоні є актуальною задачею, що має як теоретичне, так і практичне значення [5]. З моменту винайдення циклонів погляди на процес уловлення пилу постійно змінювалися. Базовою сепараційною зоною циклона вважали вихлопну трубу, циліндричну чи конічну його частини. Основними теоріями процесу були гравітаційна, відцентрова, моделювання на основі рівнянь гідрогазодинаміки.

Спочатку була популярна гравітаційна теорія циклонного процесу [12, 13, 5]. Припускалося, що незалежно від ефективності сепараційного процесу, розмір частинок, які можуть бути винесені з циклону, визначається швидкістю газів, які виходять крізь вихлопну трубу.

Границя випадання аерозольних частинок з потоку при такому представленні визначається рівністю сили захоплення цих частин потоком силі тяжіння, тобто

$$6\pi\mu V_o = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho, \quad (1.4)$$

де V_o – осьова швидкість потоку у вихлопній трубі, м/с;

ρ – об’ємна вага частинки, кг/м³;

μ – динамічний коефіцієнт в’язкості, Па·с;

r – радіус частинки, м.

З рівності (1.4) швидкість, при якій частинки заданого розміру r залишаються невагомими у висхідному осьовому потоці, дорівнює

$$V_o = \frac{2r^2}{9\mu} \rho. \quad (1.5)$$

Відповідно радіус цих частинок дорівнює

$$r = 2,12 \sqrt{V_o \frac{\mu}{\rho}}. \quad (1.6)$$

Тобто вважалося, що частинки пилу, радіус яких більший за той, що визначається співвідношенням (1.6), захоплюються циклоном.

В дійсності гравітаційне осідання частинок із висхідного потоку має не таке важливе значення. Циклонна сепарація проходить не тільки у вертикальному, а і у горизонтально розташованому апараті. Виникає суперечність з практикою. Тому висновок, який випливає з рівняння (1.6), що зі зменшенням швидкості у вихлопній трубі ефективність сепарації повинна зростати. В гравітаційній теорії не враховується зміна швидкості по перерізу вихлопної труби. Насправді висхідний потік являє собою ядро вихору, в якому швидкість спадає в напрямі від периферії до центру [12, 13, 5].

Одне з перших експериментальних досліджень газів в циклонних апаратах провів П.М.Смухін і П.А.Коузов [14, 5]. Досліджували циклони з глибоко опущеними вихлопними трубами.

На основі проведених експериментальних випробувань було запропоновано відцентрову [15, 5] теорію циклонної сепарації, яку можна розглядати як перший досвід аналітичного опису закономірностей інерційної сепарації.

П.М.Смухін та П.А.Коузов припустили, що сила інерції частинки рівна відцентровій силі, яка діє при обертанні. Крім того, швидкість частинки відрізняється від швидкості газу тільки наявністю радіальної складової (Рис. 1.7).

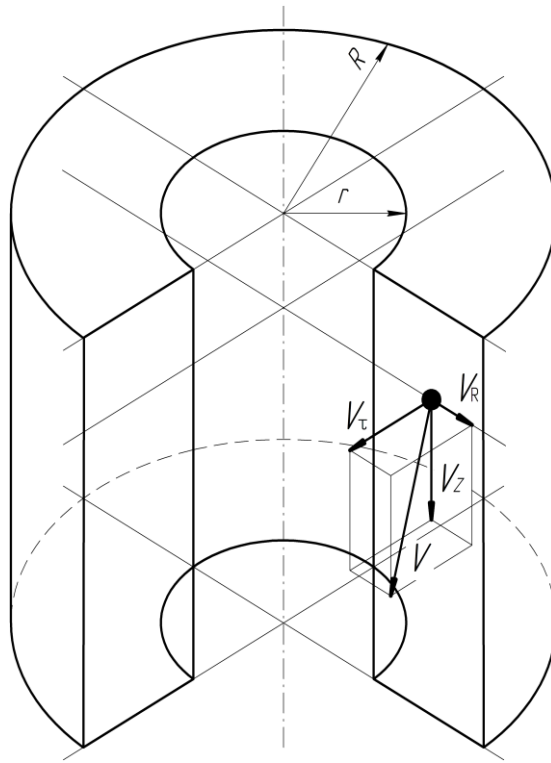


Рис.1.7. Швидкість потоку повітря та її складові

V – вектор швидкості; V_τ – тангенціальна складова; V_R – радіальна складова; V_z – осьова складова; R – радіус циліндричної частини; r – радіус вихлопної труби

Тангенціальна швидкість руху частинки в кожний момент вважається рівною швидкості руху газу в цій точці. Оскільки відцентрова сила спрямована по радіусу обертання, то зі вказаних умов отримаємо рівність [15, 5]:

$$6\pi\mu N_r = m \frac{V_\tau^2}{R}, \quad (1.7)$$

де V_r – радіальна складова швидкості частинки, тобто швидкість сепарації, м/с;

R_n – радіус потоку, м; m – маса частинки, кг;

V_τ – тангенціальна складова швидкості частинки, м/с.

Швидкість сепарації визначається залежністю:

$$V_r = \frac{dR}{dt} = \tau\omega^2 R, \quad (1.8)$$

де $\omega = \frac{V_\tau}{R}$ – кутова швидкість потоку, c^{-1} ;

τ – величина, яка має розмірність часу і називається часом релаксації частинки.

Час релаксації визначається за формулою:

$$\tau = \frac{m}{3\pi\mu d} = \frac{d_q^2}{18\mu} \rho, \quad (1.9)$$

де m – маса частинки, кг;

d_q – діаметр частинки пилу, м;

ρ – густина матеріалу частинки, кг/м³.

У загальному випадку швидкість обертання окремих шарів потоку є змінною величиною, причому величиною спадною в напрямку від центру до периферії [15, 5]. Для цього випадку з рівняння (1.9) можна отримати:

$$t = \frac{1}{\tau\omega^2} \ln \frac{R_2}{R_1}. \quad (1.10)$$

Якщо у виразі (1.10) R_1 – радіус вихлопної труби циклона, а R_2 – радіус зовнішнього циліндра циклона, то t_q – це час, за який частинка, що потрапила в апарат за найбільш несприятливих умов, пройде шлях до стінки зовнішнього циліндра [15, 5].

Час перебування частинки у висхідному потоці може бути визначений також за наближеною формулою [12, 5]:

$$t = \frac{2\pi R_{cp} n}{w} = \frac{2\pi n}{\omega}, \quad (1.11)$$

де $R_{cp} = \frac{R_1 + R_2}{2}$ – середній радіус потоку,

n – кількість обертів потоку в циліндричній частині циклону.

Остання величина важко піддається визначенню. Пиловий потік, що потрапляє до циклону, розширюється, а по мірі свого обертального руху розбивається вторинними потоками, які напрямлені до осі агрегату. Причина виникнення вторинних потоків полягає в [13,5]: швидкість повітря від осі до стінок циклона зменшується. Відповідно до рівняння Ейлера $p + \rho \frac{\omega^2}{2} = const$ для всього потоку і по мірі віддалення від осі, повинен зростати тиск. Тиск є найбільшим в шарах повітря, що прилягають до зовнішньої стінки повороту.

Під дією цього тиску повітря перетікає вздовж зовнішніх стінок до областей низького тиску, утворюючи вихор. В кінематичному відношенні циклон являє собою тривалий поворот потоку. На відміну від описаного випадку верхня частина вторинного потоку циклона спрямовується по найкоротшому шляху до початку вихлопної труби, а нижня, розповсюджуючись по вертикальній твірній циклона, формує висхідний потік циклона [15, 5, 12, 13]. Вторинні потоки виникають тоді, коли рівновага між силами статичного тиску і відцентровою силою порушується [5, 20, 13, 16, 17, 18, 19].

У циклонах П.М.Смухіна і П.А.Коузова [13, 5] глибоко опущена вихлопна труба пом'якшує вплив радіального стоку майже на всій висоті циліндричної частини, створюючи сприятливі умови для виділення аерозольних частин до зовнішньої стінки циклона.

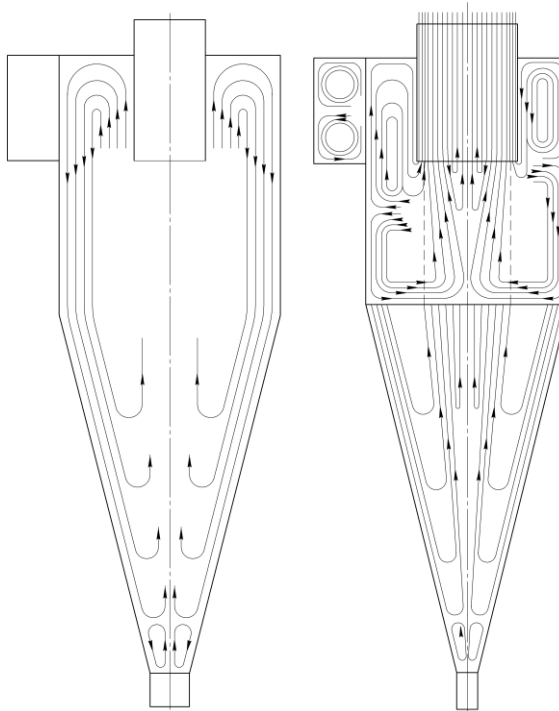


Рис. 1.8. – Зображення вторинних потоків [20, 12, 5]

Значний крок до розуміння процесів уловлення пилу в циклоні зробив О. І. Пірумов [12, 13, 5]. Диференціальне рівняння руху частинки пилу в криволінійному потоці у векторній формі було записано наступним чином [53, 55, 5]:

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{1}{\tau}(\vec{W} - \vec{V}) = -\frac{1}{\tau}\vec{V}_c, \quad (1.12)$$

де \vec{W} – середня швидкість потоку;

\vec{V} – абсолютна швидкість руху частинки відносно нерухомої системи координат; \vec{V}_c – відносна швидкість руху частинки.

Якщо врахувати, що переносний рух частинки пилу є обертальним, то відповідно до теореми Коріоліса про абсолютне прискорення точки при складному русі рівняння (1.12) можна представити як

$$\frac{d\vec{V}_c}{dt} + \vec{\omega} \cdot (\vec{\omega} \cdot \vec{R}) + \left(\frac{d\vec{\omega}}{dt} \cdot \vec{R}\right) + 2(\vec{\omega} \cdot \vec{V}_c) = -3\pi\mu d_p V_c, \quad (1.13)$$

Спроектуювавши рівняння (1.13) на осі полярної системи координат, після перетворень, маємо рівняння руху частинок в криволінійному каналі на початковому етапі

$$\frac{d}{dt} \left(R^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \right) + \frac{1}{\tau} \cdot R^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{k}{\tau}, \quad (1.14)$$

де k – деяка постійна величина, що визначається об'ємними витратами потоку повітря та геометричними розмірами поперечного перерізу криволінійного каналу [12, 13, 5].

За межами початкового етапу, рівняння (1.14) набуває вигляду:

$$\frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{1}{\tau} \frac{dR}{dt} - \frac{k^2}{R^3} = 0. \quad (1.15)$$

Внаслідок розв'язання цих рівнянь можна отримати траєкторії руху частинок пилу в циклоні.

Спільними недоліками описаних вище теорій є такі:

- не враховуються конструкційні особливості циклона;
- досліджується рух частинки тільки у циліндричній частині циклона або у вихлопній трубі;
- результати обчислення діаметра найменших частинок пилу, які будуть уловлені в циклоні, відповідно до описаних теорій, є завищеними;
- розглядається рух виключно окремої частинки пилу і нехтується взаємодією частинок між собою та зі стінкою апарата [12, 13, 5].

Найкраще аеродинамічні процеси, що відбуваються у сепараторах, можна описати за допомогою диференціальних рівнянь в частинних похідних, що представляють собою ті чи інші моделі механіки рідин і газів [21, 16, 5, 22]. Але розв'язок таких задач для циклонів можна отримати лише числовим шляхом. Тому у зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки та програмного забезпечення, суттєво розширилися можливості числового аналізу завдяки САЕ (Computer Aided Engineering) технологій, тобто технологій розрахункового аналізу конструкцій. В межах САЕ існує такий клас програм, як CFD (Computational Fluid Dynamics), що призначені для комп'ютерного аналізу потоків. Сюди можна віднести такі пакети програм, як CosmosFloWorks, Fluent, FlowVision та інші [53, 55, 5].

1.5. Промислові осушувачі повітря

Для ефективного осушення виробничого повітря, а саме: на складах, на будівництві, при ремонті приміщень, сушці деревини, рибної продукції, зерна та овочів, у

винних погребях, у фармацевтиці, при зберіганні масивної паркетної дошки, у кондитерському виробництві, документальних архівах, музеях тощо широко застосовують промислові осушувачі повітря.

Контроль рівнів вологості у виробництві має основне значення для виробництва продукції [1]. Цукеркову глазур, обробки м'ясних виробів, зберіганні батарежок або виготовленні скла - підтримання оптимального рівня вологості скорочує виробничі витрати шляхом досягнення більшої ефективності та зниженні числа дефектів продуктів.

Осушення повітря вирішує чотири основні проблеми, які зазвичай виникають у виробництві:

- Потрапляння вологи або закупорювання та злипання: осушення повітря запобігає процесу потрапляння вологи при обробці порошоків і пудр, а також при роботі з продуктами в таких зонах як: бункери зберігання цукрового піску, пакувальні цехи, приміщення зберігання добрива на основі нітрату амонію і обгортання цукерок.
- Конденсація: конденсація, яка може призводити до утворення цвілі, зростання грибка і забруднення від попадання крапель вологи зверху, має місце, коли такі холодні поверхні, як труби, бункери і стелі у виробничих цехах оточені вологим повітрям. Системи осушення повітря запобігають виникненню конденсації шляхом підтримки постійної температури конденсації в повітрі, що оточує холодні поверхні, встановленої трохи нижче температури найбільш холодної з таких поверхонь.
- Корозія: видалення вологи з повітря запобігає розвитку ржавіння на металевих поверхнях і гниття органічного матеріалу.
- Сушка продуктів, сприйнятливих до високих температур: багато типів продуктів повинні висувуватися до низьких рівнів вмісту вологи, але не переносять надлишкового тепла, включаючи фармацевтичну діагностику, смоли, промислові ферменти і більшість білків.

Для осушення повітря існує ряд методів таких як абсорбція та конденсація, кожен з цих методів буде розглянуто в наступному підрозділі. Для проведення аналізу видів та принципів роботи промислових осушувачів було розглянуто статті компаній «Desiccant Technologies Group Україна» [1], «Dantherm» [2], [4], «ARIACOM» [3].

1.6. Методи осушення повітря

1.6.1. Абсорбція

Цей метод заснований на адсорбційних (вологопоглиначах) властивості деяких речовин – сорбентів (рис.1.9). Маючи особливу пористу структуру, сорбенти вбирають в

себе вологу з повітря. Чим більше насичується адсорбент вологою, тим більше ефективність осушення знижується. Тому сорбент потрібно періодично регенерувати, тобто видаляти з нього вологу шляхом продування потоком гарячого повітря [2].

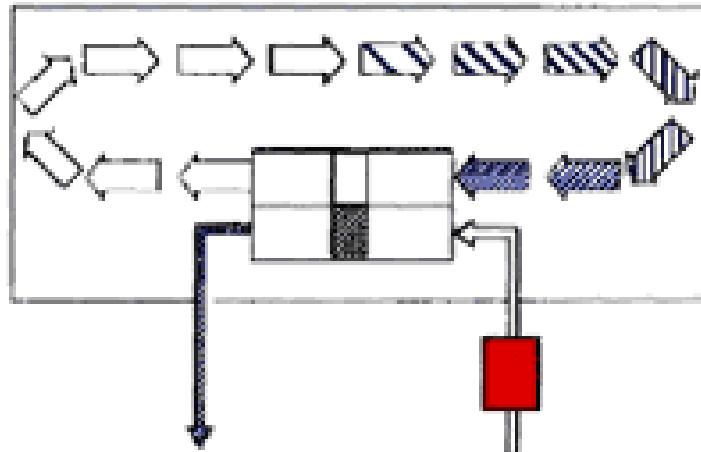


Рис.1.9. Абсорбційний метод осушення

До недоліків методу відноситься короткий термін служби сорбенту. Більш практичним є використання силікагелю [2].

2.Конденсація. Принцип роботи полягає у конденсації водяної пари, що містяться в повітрі, при охолодженні його нижче точки роси (рис.1.10).



Рис.1.10. Рефрижераторний метод осушення

Метод, схематично зображений на рис.1.10, реалізується з використанням теплового удару, який створюється при роботі холодильного контуру. Переваги рефрижераторного та адсорбційного методів осушення повітря зображено на графіку (рис.1.11). У рефрижераторних осушувачів зі зростанням температури повітря

збільшується вологознімання на 1 кВт споживаної енергії. У адсорбційних осушувачів навпаки. Ефективність рефрижераторних осушувачів різко падає зі зменшенням відносної вологості повітря, а у адсорбційних осушувачів дана залежність виражена набагато менше. Тому можна чітко виділити області переважного використання кожного з типів осушувачів. Конденсаційний метод більш ефективний у порівнянні з адсорбційним.

Існує два типи промислових осушувачів повітря, принцип дії і пристрої яких досить сильно розрізняється. Перший тип - конденсаційні осушувачі. Принцип їх роботи ґрунтується на конденсації вологи з повітря. Найефективніше обладнання цього типу працює при вологості повітря від 40% і температурі повітря +10 °С і вище.

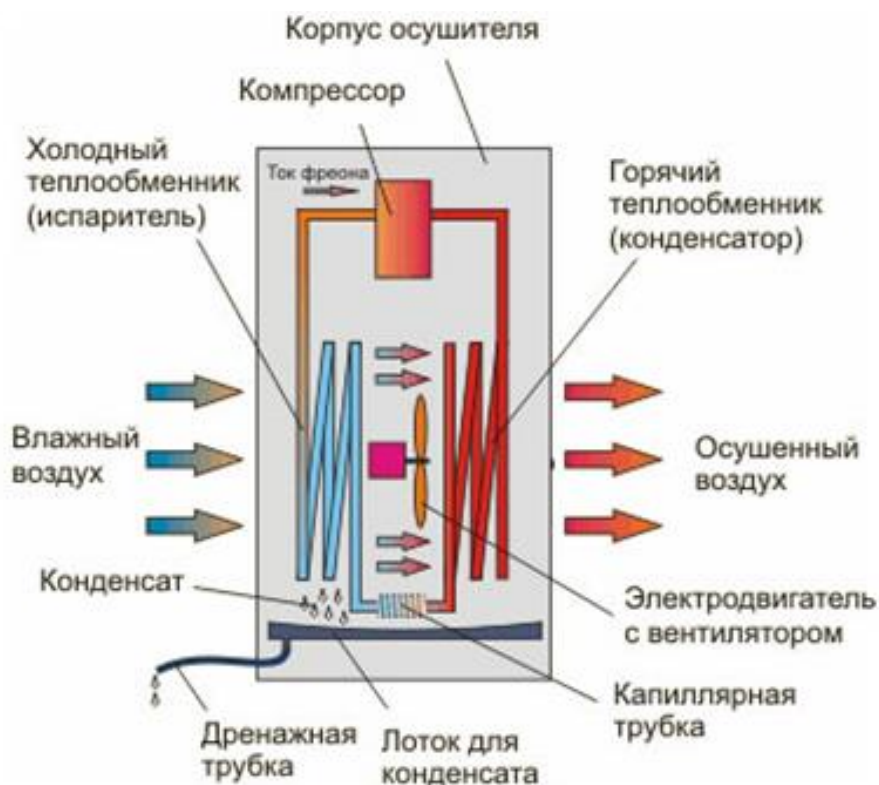


Рис. 1.11. Принципова схема роботи конденсаційного осушувача

Другий тип - адсорбційні осушувачі. Як зрозуміло з назви, вони працюють за принципом адсорбції (вбирання) вологи з повітря спеціальними гігроскопічними матеріалами. Осушувачі цього типу особливо ефективні в тих випадках, коли необхідно домогтися дуже низьких показників відносної вологості (наприклад, 1-2%). Адсорбційні осушувачі використовують, коли температура навколишнього повітря нижче 10 °С і при будь-яких рівнях вологості (рис. 1.12).

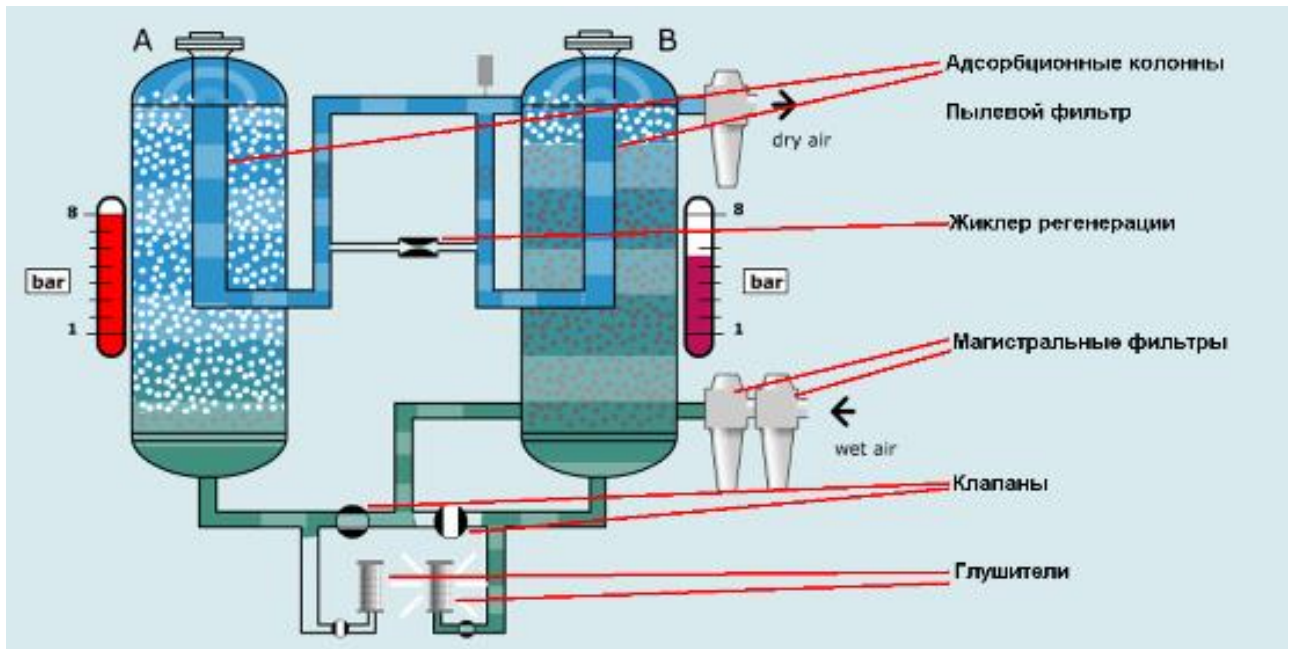


Рис. 1.12. Принципова схема роботи абсорбційного осушувача

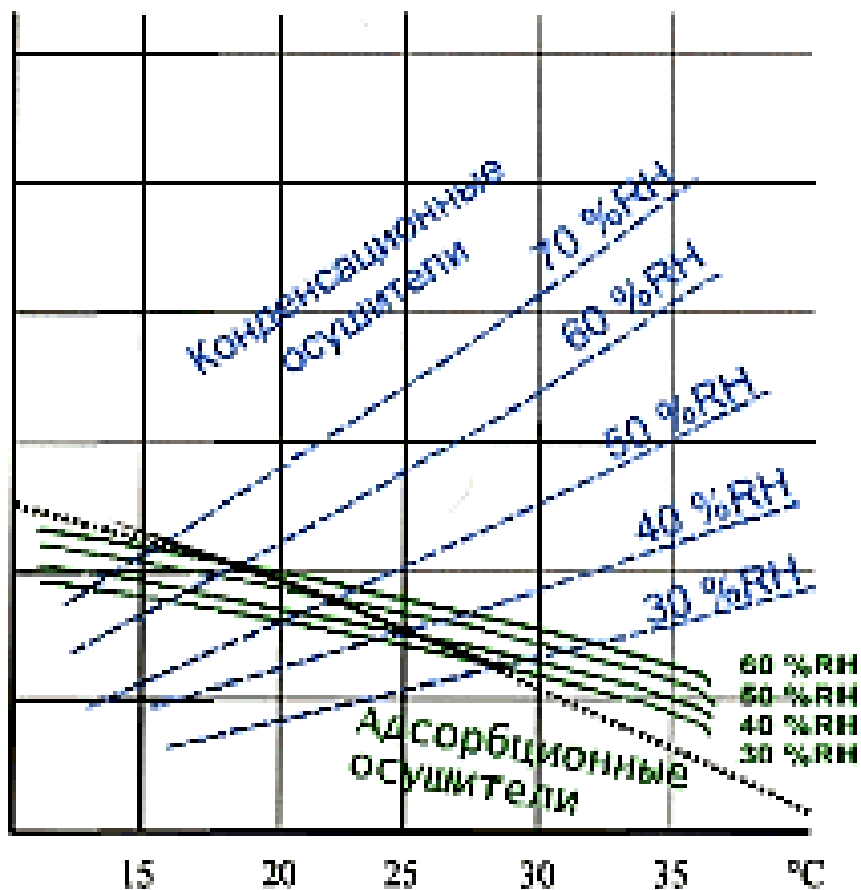
Враховуючи принцип роботи кожного типу осушувача, можна зробити висновок про їх недоліки. Деякі з них приведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1.

Переваги та недоліки осушувачів повітря

Тип осушувача	Переваги	Недоліки
Рефрижераторний	<ul style="list-style-type: none"> - мінімальні втрати стисненого потоку повітря при осушенні; - не вимагає регулярного обслуговування. 	<ul style="list-style-type: none"> - підходить тільки для обладнання, що не потребує високого ступеня осушення повітряного середовища; - не може працювати з повітряним потоком низької температури; - Встановлюється в опалювальних виробничих приміщеннях.
Абсорбційний	<ul style="list-style-type: none"> - найвища ступінь осушення; функціонування при низьких температурах (до -70°C); - заміна адсорбенту кожні 5 років. 	<ul style="list-style-type: none"> - втрати осушуваних повітряних мас, особливо при холодній регенерації; - оснащення системою фільтрації перед адсорбентом для збору залишків олії, твердих частинок.

Осушення повітря шляхом охолодження може бути особливо ефективним, коли повітря тепле, а рівень вологості високий. При цих умовах система охолодження може видаляти від двох до чотирьох разів енергії (температура і волога) з потоку повітря від тієї електричної енергії, яку споживає машина для виконання цього завдання. Висушуваний повітря проходить через змійовик охолодження. У міру охолодження повітря, він втрачає здатність утримувати водяну пару. Вода конденсується на поверхні змійовика охолодження і стікає в стічний лоток у вигляді рідини. Повітря стає сухішим в абсолютних величинах, але тепер він насичений, це означає, що його відносна вологість



становить близько 100%.

Рис.1.14. Графіки залежності роботи осушувачів від температури охолодження.

Якщо потрібна низька відносна вологість додатково до більш низького абсолютним обсягом вологи, повітря може бути прогрітий після проходження змійовика. Такі експлуатаційні принципи, які використовуються в осушці повітря споживчого класу, які можуть використовуватися для осушення сирого підвального приміщення. Повітря проходить через змійовик охолодження, який остуджує і висушує його. Потім насичене

повітря проходить через другий змійовик, в якому в повітряний потік подається тепло компресора і холодоагенту, що знижує відносну вологість до того, як повітря подається в приміщення. Звичайні системи кондиціонування повітря також здійснюють осушення подібним чином, але таке обладнання зазвичай налаштоване для оптимального видалення тепла, а осушення є побічним продуктом основної функції охолодження повітря. Для промислових цілей осушення на основі охолодження здійснюється спеціальними установками з обробки повітря, оптимізованими для видалення вологи, а не тепла. Ці установки дуже ґрунтовно охолоджують невеликі обсяги повітря на відміну від незначного охолодження великих обсягів повітря. Більш глибоке охолодження конденсує більше вологи з повітря [2].

1.7. Осушення на основі адсорбенту

Для більш конкретного вивчення принципу роботи осушувача на основі адсорбенту була розглянута стаття компанії «Desiccant Technologies Group Україна» [1], але в даній статті не розглядалась тема осушення повітря на основі рефрижераторного осушувача. Тому була розглянута стаття компанії «ARIACOM» [3] в наступному підрозділі.

Коли потрібна низька температура конденсації, або дуже низькі рівні відносної вологості, осушення на основі адсорбенту - найбільш вигідним. Поверхня сухого адсорбенту має дуже низький тиск водяної пари. Водяна пара відходить від вологого повітря на поверхню адсорбенту для усунення різниці тиску водяної пари. Потім, поверхня адсорбенту збирає певну кількість водяної пари для сталості тиску водяної пари вологого повітря. Далі, адсорбент повинен висушуватися від подачі на нього тепла до моменту його відновлення і готовності продовжувати свою роботу. Існують різні способи подачі адсорбенту до повітряного потоку. У сучасних промислових осушувачах повітря адсорбент знаходиться в легкій формі у вигляді колеса, яке обертається між двома окремими потоками повітря. Адсорбент розташований у стінках тонких повітряних каналів, які проходять по глибині колеса. Діаметр цих каналів не різний, але в основному - близько двох міліметрів. Діаметр колеса залежить від того, скільки повітря має пройти крізь нього. Великі потоки повітря потребують великих діаметрів колеса.

Повітря проходить через абсорбційне колесо, віддаючи водяну пару адсорбентам, що знаходиться в стінках повітряних шляхів. Після чого сухе повітря переноситься в точку користування вентиляторами або нагнітачами. Гаряче повітря підігріває колесо, виводячи водяну пару з адсорбенту. Кожне відділення колеса проходить через повітря реактивації, його адсорбент регенерується і знову видаляє вологу з технологічного

повітря. Коли повітря осушене, температура технологічного повітря піднімається відповідно до обсягу вилученої води. Більш сухе повітря – це більше тепле повітря. [1].

1.8. Осушення на основі рефрижераторного осушувача

Відносна вологість повітря, що постачається компресором, варіюється в межах 30-90% . І наслідки її можливого потрапляння до обладнання можуть бути дуже різними: від корозії складових установки до повного збою в роботі всієї системи. На сьогоднішній день одним з найбільш поширених і простих способів зниження рівня вологості стисненого повітря вважається використання рефрижераторних осушувачів. В якості холодогенту в них застосовується фреоновий газ. Волога, що знаходиться в стисненому повітрі, спочатку конденсується, а потім відділяється [3].

Кількість конденсованої вологи збільшується від зростання різниці між температурою стисненого повітря на виході і на вході. Чим нижче температура охолодження - тим менше вологи залишається в стисненому повітрі. У рефрижераторних осушувачах показник точки роси дорівнює $+3^{\circ}\text{C}$ - це температура охолодження повітря, при якій водяна пара досягає стану насичення і конденсується в росу. В цілому, сам процес роботи такого осушувача досить простий:

1. Тепло, яке приганяють стисненим повітрям, в теплообміннику поглинає інше, вже охолоджене повітря, що рухається у зворотному напрямку. Саме на цій стадії конденсується близько 60% тієї вологи, що знаходиться у стисненому повітрі.

2. Стиснене повітря досягає температури конденсації при проходженні крізь рефрижераторний теплообмінник і наступному охолодженні. Компресор забезпечує циркуляцію холодоагенту. Основним мінусом таких осушувачів є обмежена можливість зниження температури точки роси [3].

Рефрижераторний осушувач складається з двох контурів. В одному з цих контурів циркулює охолоджений повітря, в іншому - холодоагент. Волога з гарячого і вологого повітря видаляється в під час охолодження його в двох теплообмінниках: спочатку в теплообміннику типу «повітря-повітря», потім - в іншому теплообміннику типу «повітря-холодоагент», який являє собою випарник [3].

Безпосередньо в самому випарнику відбувається процес кипіння холодоагенту, який бере енергію перетворення з повітря, знижуючи його температуру до точки роси. Волога з охолодженого таким способом повітря випадає як конденсат, утворюючи крапельки води. Щоб видалити їх, повітря проходить через відцентровий віддільник конденсату – сепаратор. Таким чином, отримані краплі води автоматично забираються з

системи за допомогою електроклапана скидання конденсату. Контур холодоагенту - це простими словами холодильна машина. Тут холодоагент проганяється по колу холодильним компресором. Для охолодження холодоагенту, попередньо стиснене і нагріте повітря у компресорі, надходить в конденсатор. Цей конденсатор є теплообмінником, в якому гарячий теплоносіє проходить через спеціальну систему з мідних трубок, оточених ребристою алюмінієвою структурою. Процес теплообміну спрощується через те, що обидва використуваних матеріалу - алюміній і мідь - мають особливо високу теплопровідність. На конденсаторі для здійснення більшого охолодження алюмінієвих ребр встановлюється особливий осьовий вентилятор [3].

Охолоджений холодоагент після конденсатора виявляється в капілярній трубці. Температуру в даній капілярній трубці слід постійно контролювати, інакше при падінні її значення до мінусового на випарнику може почати утворюватися лід. Тому передбачений спеціальний датчик, який самостійно здійснює контроль температури. Зазвичай він налаштований на заданий мінімально допустиме значення температури. У рефрижераторних осушувачах, які найбільше поширені в наш час, температура точки роси зазвичай дорівнює $+ 3^{\circ} \text{C}$, а кількість вологи в осушеному повітрі становить не більше $5\text{г}/\text{м}^3$ [3].

1.9. Осушення абсорбційного типу в порівнянні з осушенням, заснованим на охолодженні

Порівняння двох методів осушення повітря наглядно розглянути у статті компанії «Desiccant Technologies Group Україна» [1].

Часто виникають питання про те, який з цих двох методів є найкращий. У більшості випадків обидві ці технології використовуються в такому ключі: «співпрацювати, а не конкурувати». Осушення на основі охолодження вирішує питання з вмістом вологи при високих температурах конденсації, а абсорбційне осушення видаляє вологу при більш низьких температурах конденсації. Конкретний вибір комбінації цих двох технологій буде залежати від характеристик конкретного застосування. [1].

В даному порівнянні не вказано вплив вологості повітря на властивості матеріалів, що досліджено в статті «Dantherm» [4]. Тому в наступному підрозділі і було розглянуто зміну властивостей матеріалів при зміні вологості повітря.

Переважає більшість неорганічних і органічних матеріалів, речовин і компонентів володіє деякою ступеню гігроскопічності, тобто мають властивість поглинати (сорбувати) водяні пари з повітря. Для всіх пористих матеріалів існує певна залежність між кількістю

поглиненої ним води і відносною вологістю навколишнього повітря. Максимальна гігроскопічна вологість матеріалів відповідає максимальній 100%-ній вологості повітря [4].

Небажане підвищення гігроскопічної вологості матеріалів призводить до:

- збільшення ваги і (або) обсягу (зміни щільності);
- зміни електричної провідності;
- зміни теплопередачі і тепловіддачі;
- протіканню хімічних реакцій;
- зміни якості продукту;
- зміни ефективності процесу;
- зміни в'язкості рідин;
- зміни межі міцності на розрив;
- зміни пружності та пластичності;
- зміни умов росту бактерій і мікроорганізмів.

Матеріали з дуже малою гігроскопічністю також піддані впливу водяної пари вологого повітря, яке спочатку проявляється в поверхневих шарах. Часті випадки і наслідки надмірного підвищення вологості повітря [4]:

1. При високій вологості повітря погіршується якість опору електроізоляційних матеріалів, в тому числі самого повітря як електроізолятора. Це призводить до неконтрольованих відмов, які можуть перейти у великі аварії та катастрофи, перш за все через короткі замикання.
2. При відносній вологості вище 70% створюються сприятливі умови для швидкого зростання цвілі. При менших значеннях вологості зростання цвілі повністю припиняється.
3. Надмірна гігроскопічна вологість продуктів погіршує їх якість і призводить до псування.
4. Metalli, практично не володіють гігроскопічністю, на повітрі схильні до корозії. Низька вологість гарантує низьку прогресивність корозії. У заліза корозія практично відсутня при відносній вологості до 40-45%. Незначна корозія заліза починається при підвищенні відносної вологості від 40-45% до 60-70% (так званого «критичного» значення вологості). Вище цього значення швидкість корозії заліза різко збільшується і відбувається швидке руйнування металу. [4].

Надмірно вологе чи сухе повітря в будь-якому випадку впливає на наше життя та навколишнє середовище. Кожного дня людство зіштовхується з цією проблемою, тому і виникає необхідність контролювання ступеня осушення повітря. Проте ця проблема не

тільки в осушені повітря, а й у його очищені. Тому дане питання й буде розглядатися в наступному підрозділі [3,4].

1.10. Висновки

1. Проаналізувавши широке коло сучасних методів та принципів а осушення повітря в промисловості, було встановлено, що єдиного методу осушення для всіх галузей не існує. Проведено аналіз основних методів та принципів осушення, по результатам якого було зроблено висновок, що дані конструкції осушувачів не задовольняють поставлену задачу магістерської дисертації. Тому виникає необхідність у вдосконаленні існуючих методів та пристроїв осушення.

2. Провівши аналіз сучасних типів циклонів, було виявлено, що даний агрегат можна використовувати за конструктивну базу для розроблення нового обладнання. Циклон буде виконувати функцію очисника повітря.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ, РОЗРАХУНОК ЦИКЛОНУ ТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КАВІТАТОРА

Для дослідження циклону виконання розрахунку його габаритів та конструкційних параметрів є недостатнім. Існують різні фактори, які впливають не тільки на геометрію циклону, а й на його робочі характеристики. Тому розрахунок габаритних розмірів має бути проведений на основі результатів математичного моделювання аеродинаміки циклону.

В основу досліджень покладено аеродинамічного дослідження циклону, полів швидкості та статичного тиску. У роботах авторів Білоусова В. В., Коузова П. А., Дорундяк Л.М., Білухи М. Т., Ковальова В.А., Яхно О.М. та ін., на основі

експериментальних досліджень, запропоновано нову геометрію циклону, яка б повністю задовольняла початкові умови експлуатації.

2.1. Методика теоретичного дослідження

До основних параметрів, які характеризують роботу циклона належать [8]:

- 1) продуктивність;
- 2) ефективність, або коефіцієнт корисної дії (ККД);
- 3) гідравлічний опір.

Під продуктивністю циклона Q розуміють кількість повітря, що очищується під час проходження крізь циклон за одиницю часу. Одиниці вимірювання цієї величини: м³/год, м³/с. Значення продуктивності отримують як добуток швидкості потоку у вхідному патрубку та площі поперечного перерізу патрубка. Конструкція циклона характеризується рекомендованими значеннями швидкості потоку у вхідному патрубку та фіктивною швидкістю, під якою розуміють відношення продуктивності апарата до площі поперечного перерізу радіального зазору [8].

Ефективність η процесу очищення суміші (коефіцієнт корисної дії апарата або ефективність циклона) визначено як відношення ваги вловленого $G_{ex} - G_{вих}$ до ваги пилу, що надійшов до циклону G_{ex} :

$$\eta = \frac{G_{ex} - G_{вих}}{G_{ex}} \cdot 100\% , \quad (2.1)$$

де G_{ex} і $G_{вих}$ – відповідно вага пилу на вході та виході з циклона.

Втрати тиску на гідравлічному опорі Δp визначено пропорційним різниці повних тисків на його вході та виході. Він залежить від швидкості потоку у вхідному патрубку апарата. Для кожної конструкції циклона таку залежність досліджують експериментально і одержують графічну залежність (Рис. 2.1), яку називають аеродинамічною характеристикою циклона [8].

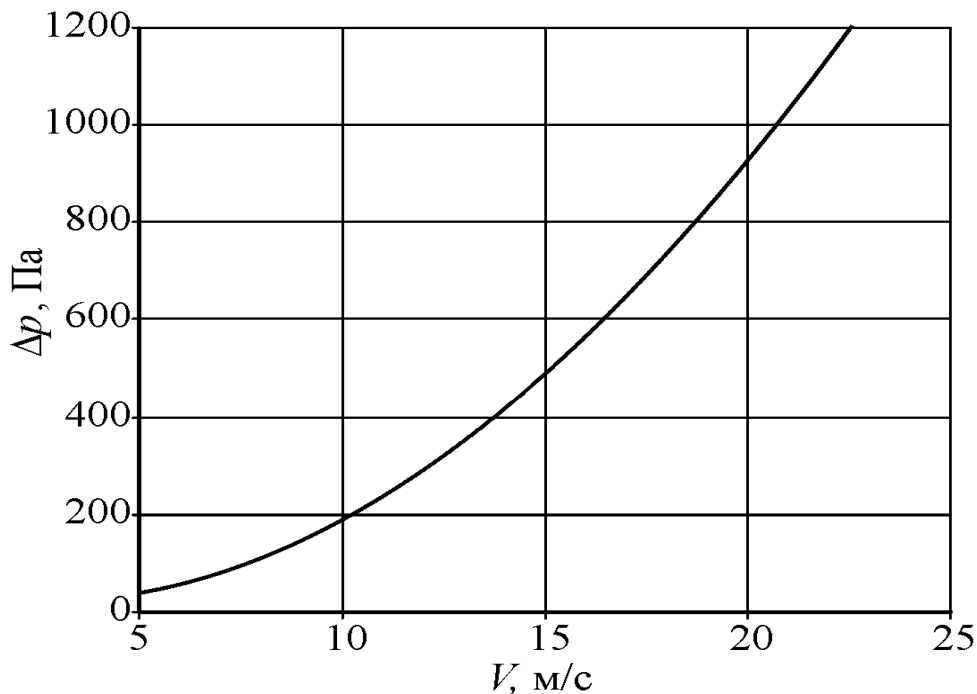


Рис.2.1. – Аеродинамічна характеристика циклона ЦН-15

Загальне
емпіричне рівняння
перепаду тиску ΔP
в циклоні:

$$\Delta P = \zeta_c \cdot \rho \cdot \frac{V_i^2}{2}, \quad (2.2)$$

де V_i –
швидкість потоку у
вхідному патрубку
циклона, ζ_c –

коефіцієнт гідравлічного опору, ρ – густина повітря.

Коефіцієнт гідравлічного опору ζ_c є одним з основних показників, що характеризують енергоємність процесу очищення пило-повітряної суміші в циклоні. Для кожної конструкції сепаратора його визначають експериментальним шляхом. В роботах [26, 27, 8] описано емпіричні рівняння для знаходження ζ_c :

$$\zeta = X \cdot \left(\frac{A_i}{D_c^2} \right)^z, \quad (2.3)$$

де X і Z – функції геометрії циклона, A_i , D_c – відповідно площа вхідного патрубка і діаметр вихлопної труби.

Результати теоретичного визначення об'єктивних технічних параметрів циклонів (ефективності та гідравлічного опору) дають тільки наближені до реальних значення [53, 55, 5]. Перш за все, це пов'язано з дуже складними аеродинамічними процесами, що відбуваються всередині апарата. Точний результат може бути одержаний тільки експериментальним шляхом для кожної конструкції циклона [28, 8].

Окрім основних характеристик циклона є й інші параметри, які характеризують процес очищування запиленого повітря в апаратах. До них належать: витрати електроенергії, вартість очищення, металоємність, стійкість до абразивної дії запиленого потоку повітря, що визначає термін експлуатації апарата. Абразивне зношення виникає внаслідок скупчення частинок поблизу стінки циклона та їх динамічної взаємодії [53, 55, 5].

Для того, щоб побудувати математичну модель уловлення матеріальних частинок в циклонах часто застосовують такі характеристики: $d_{кр}$ – критичний діаметр частинок, які будуть вловлені в циклоні та d_{50} – діаметр частинок, ймовірність уловлення яких складає 50% [28, 8].

Зазвичай «методу оцінки циклона» є два основних принципи, що застосовують при розрахунках пиловловлювачів. Перший – це припущення про те, що розподіл фракційних ефективностей відцентрового пиловловлювача описується логарифмічно нормальним законом розподілу, тобто може бути охарактеризований двома параметрами: d_{50} – діаметром частинок, ймовірність уловлення яких складає 50%, і $lg \sigma_\eta$ – середнім квадратичним відхиленням функції розподілу фракційних ефективностей. Другий – перерахунок параметра за d_{50} умов ρ_n, W_2, μ_2, D_u на дійсні умови роботи циклона $\rho_n^*, W_2^*, \mu_2^*, D_u^*$, здійснюється на основі рівності критеріїв Стокса за формулою [26, 8]:

$$d_{50}^* = d_{50} \cdot \sqrt{\frac{\rho_n \cdot W_2 \cdot \mu_2^* \cdot D_u^*}{\rho_n^* \cdot W_2^* \cdot \mu_2 \cdot D_u}}, \quad (2.4.)$$

де ρ_n – густина частинки пил, кг/м³; W_2 – швидкість газу в циліндричному перерізі циклона, м/с; μ_2 – динамічна в'язкість газу, Па·с.

Внаслідок проведених розрахунків зроблено висновок, що коефіцієнт гідравлічного опору циклона можна знаходити за такою формулою:

$$d_{50}^* = 64,35 \cdot \xi^{-0,511}; \quad \xi = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_2 \cdot W_u^2}, \quad (2.5)$$

де Δp – втрати тиску Δp на гідравлічному опорі, Па, ρ_2 – густина газу, кг/м³.

Під час розроблення нових конструкцій циклонів не слід надмірно підвищувати їх гідравлічний опір тому, що зменшення значення d_{50} є незначним. Зменшення ξ призводить до значного погіршення показника d_{50} [28, 8].

В циклонах зазвичай досліджують такі параметри:

- 1) втрати тиску Δp на гідравлічному опорі (Па);
- 2) ефективність η (%).
- 3) розподіл швидкості потоку повітря та статичного тиску.

2.2. Математичне моделювання руху повітря у циклоні

Для обґрунтування основних параметрів сепаратора важливе значення має аналіз потоку повітря в циклоні. Процеси, які при цьому відбуваються, є складними і на сьогодні їх не вдалося повною мірою теоретично описати і дослідити. Залежно від фізико -

механічних властивостей потоку та конструкцій-них особливостей циклону потік повітря може бути як ламінарним, так і турбулентним. При цьому біля стінок має місце явище примежового шару [8].

Система рівнянь для аналізу аеродинамічних процесів у циклоні містить рівняння Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності, стану і балансу тепла, які можна представити наступним чином [8]. Рівняння Нав'є-Стокса є основним рівнянням динаміки в'язкого газу і у векторному записі має такий вигляд [11]:

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad}(p + \frac{2}{3} \mu \text{div}\vec{V}) + 2\text{Div}(\mu \dot{S}). \quad (2.6)$$

У проекціях на осі декартової системи координат x, y, z дане рівняння можна представити таким чином [11]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \text{div}\vec{V}) \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \text{div}\vec{V}) \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \text{div}\vec{V}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

де $\vec{V}(u, v, w)$ – вектор швидкості точки суцільного середовища з координатами x, y, z в момент часу t (змінні Ейлера);

$u = u(x, y, z, t), v = v(x, y, z, t), w = w(x, y, z, t)$ – проекції вектора швидкості на осі нерухомої декартової системи координат;

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}; \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}; \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \quad \text{– проекції вектора прискорення на осі нерухомої декартової системи координат [11];}$$

$\rho = \rho(x, y, z, t)$ – густина середовища в точці з координатами (x, y, z) в момент часу t ;

$\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$ – вектор масової сили;

$\text{div}\vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ – дивергенція вектора швидкості \vec{V} ;

$\text{grad}\varphi = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)$ – градієнт скалярного поля функції φ ;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

$$\dot{\mathbf{s}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} - \text{тензор швидкості деформації [11];}$$

$\text{Div}T$ – дивергенція тензора T , яка визначається співвідношенням [11]:

$$\begin{aligned} (\text{Div}T)_x &= \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} \\ (\text{Div}T)_y &= \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} \\ (\text{Div}T)_z &= \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \end{aligned}$$

Рівняння нерозривності є математичним записом закону збереження маси певного об'єму суцільного середовища і у векторному представленні має вигляд [16]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.8)$$

або у декартовій прямокутній системі координат [11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (2.8')$$

Рівняннями стану в механіці суцільного середовища називають рівняння, що пов'язують між собою тиск, температуру, густину та, можливо, інші фізичні характеристики середовища і входять у повну систему залежності для опису руху деякого об'єму речовини. У випадку вивчення руху в'язкого газу припускають, що газ є досконалим, тобто тиск p , густина ρ і абсолютна температура T задовольняють закону Клапейрона [11,16]:

$$p = \rho RT, \quad (2.9)$$

де R – газова постійна, яка для різних газів приймає різні значення.

Якщо припустити, що коефіцієнт теплоємності при постійному тиску c_p є константою, то рівняння Клапейрона можна переписати в наступному вигляді [11]:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R}{c_p} h, \quad (2.9')$$

де h – ентальпія (теплова функція), яка задається співвідношенням [11]:

$$h = \int_0^T c_p(T) dT.$$

Припустимо також, що динамічний коефіцієнт в'язкості μ є функцією тільки абсолютної температури T . Найчастіше при цьому використовується степенева залежність [11,16]:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (2.10)$$

де T_0 і μ_0 – відповідно абсолютна температура і коефіцієнт в'язкості, що відповідають деякому початковому стану газу [11]:

$$n = \begin{cases} 1, & T < 90K \\ 8/9, & 90 < T < 250K \\ 3/4, & 250 < T < 600K \\ 1, & T > 600K \end{cases}.$$

Згідно з гіпотезою Кармана [83] в середньому приймають $n=0,76$.

Невід'ємним атрибутом рівнянь руху в'язкого газу є рівняння балансу тепла, яке можна представити двома способами [11]:

$$\rho \frac{d}{dt} \left(h + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \vec{P} \cdot \vec{V} + \frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}(2\mu \vec{V} \dot{S} - \frac{2}{3} \mu \vec{V} \text{div} \vec{V} + \frac{\mu}{\sigma} \text{grad} h) \quad (2.11)$$

$$\text{або} \quad \rho \frac{dh}{dt} = \frac{dp}{dt} + 2\mu \dot{S}^2 - \frac{2}{3} \mu (\text{div} \vec{V})^2 + \text{div} \left(\mu \text{grad} \frac{h}{\sigma} \right), \quad (2.11')$$

де $\sigma = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ – число Прандтля; λ – коефіцієнт теплопровідності газу.

Існує велика кількість конструкцій циклонів, проте у переважній своїй більшості корпуси цих пиловловлювачів є комбінацією циліндричних і конічних поверхонь, а тому для дослідження аеродинамічних процесів, що відбуваються всередині сепараторів доцільно використати не прямокутну декартову систему координат (x, y, z) , а циліндричну (r, θ, z) . Основні рівняння можна записати наступним чином [8, 53].

Рівняння Нав'є-Стокса в циліндричній системі координат набувають вигляду [11,16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} &= F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 V_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right); \\ \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} &= F_\theta - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\nabla^2 V_\theta - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right); \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 V_z \end{aligned} \quad (2.12)$$

де $\vec{V}(V_r, V_\theta, V_z)$ – вектор швидкості точки суцільного середовища з координатами r, θ, z в момент часу t ;

$V_r(r, \theta, z, t), V_\theta(r, \theta, z, t), V_z(r, \theta, z, t)$ – проекції вектора швидкості на осі нерухомої системи координат;

$\rho = \rho(r, \theta, z, t)$ – густина середовища в точці з координатами (r, θ, z) в момент часу t ;

$\vec{F} = (F_r, F_\theta, F_z)$ – вектор масової сили;

$\text{div} \vec{V} = \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z}$ – дивергенція вектора швидкості \vec{V} в циліндричній системі координат [11];

$\text{grad} \varphi = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)$ – градієнт скалярного поля функції φ ;

$$\dot{s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_r}{\partial r} & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_\theta}{r} \right) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_\theta}{r} \right) \right) & \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} \right) & \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{bmatrix} \text{ – тензор деформації [11].}$$

Дивергенція тензора T $\text{Div} T$ в циліндричній системі координат визначається співвідношеннями

$$\begin{aligned} (\text{Div} T)_r &= \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{rz}}{\partial z} + \frac{T_{rr} - T_{\theta\theta}}{r} \\ (\text{Div} T)_\theta &= \frac{\partial T_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{z\theta}}{\partial z} + \frac{T_{r\theta} - T_{\theta r}}{r} \\ (\text{Div} T)_z &= \frac{\partial T_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{T_{rz}}{r} \end{aligned}$$

Рівняння нерозривності у циліндричній системі координат має вигляд [11, 16]:

$$r \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_r r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V_\theta)}{\partial \theta} + r \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0, \quad (2.13)$$

$$\frac{dV_r}{dt} = \dot{V}_r = \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r};$$

$$\frac{dV_\theta}{dt} = \dot{V}_\theta = \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r};$$

$$\frac{dV_z}{dt} = \dot{V}_z = \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z}$$

– проекції вектора прискорення на осі нерухомої циліндричної системи координат;

Таким чином, для визначення семи невідомих u, v, w, p, ρ, μ, T маємо систему семи рівнянь, які складають замкнуту систему рівнянь руху в'язкого газу. Зазначимо при цьому, що для в'язкого газу повинні також виконуватися такі припущення:

а) газ є „ньютонівським” середовищем, тобто має місце узагальнений закон Ньютона про лінійний зв'язок між тензором напружень \dot{P} і тензором швидкостей деформації \dot{S}

$$\dot{P} = 2\mu\dot{S} - \left(p + \frac{2}{3}\mu\text{div}\vec{V} \right) E,$$

б) коефіцієнти теплоємності c_p і c_v , а значить і їхнє відношення k , не залежить від абсолютної температури газу і є фізичними константами газу.

в) коефіцієнт теплопровідності газу λ пропорційний динамічному коефіцієнту в'язкості μ , так що число Прандтля $\sigma = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ розглядається як фізична постійна газу, тобто $\sigma = \text{const}$.

Припустимо, що число Рейнольдса Re буде меншим за деяке критичне значення $Re_{кр}$ ($Re < Re_{кр}$), тобто розглядається ламінарний рух середовища [8].

Для отримання розв'язку в конкретній області при інтегруванні системи диференціальних рівнянь необхідно задати початкові і граничні умови. Як початкові умови визначають задання у початковий момент часу поля швидкостей, температури і тиску. У момент часу $t=0$ частинки повітря знаходяться у перерізі $z=0$ (Рис. 2. 2). Якщо позначити швидкість потоку повітря у вхідному патрубку циклона V , то значення складових швидкості потоку повітря для циклона з гвинтовим вхідним патрубком дорівнює [8, 55]:

$$V_{\theta} = V \cdot \cos\alpha; V_z = V \cdot \sin\alpha; V_r = 0,$$

де α – кут нахилу вхідного патрубка до горизонту (Рис. 2.2).

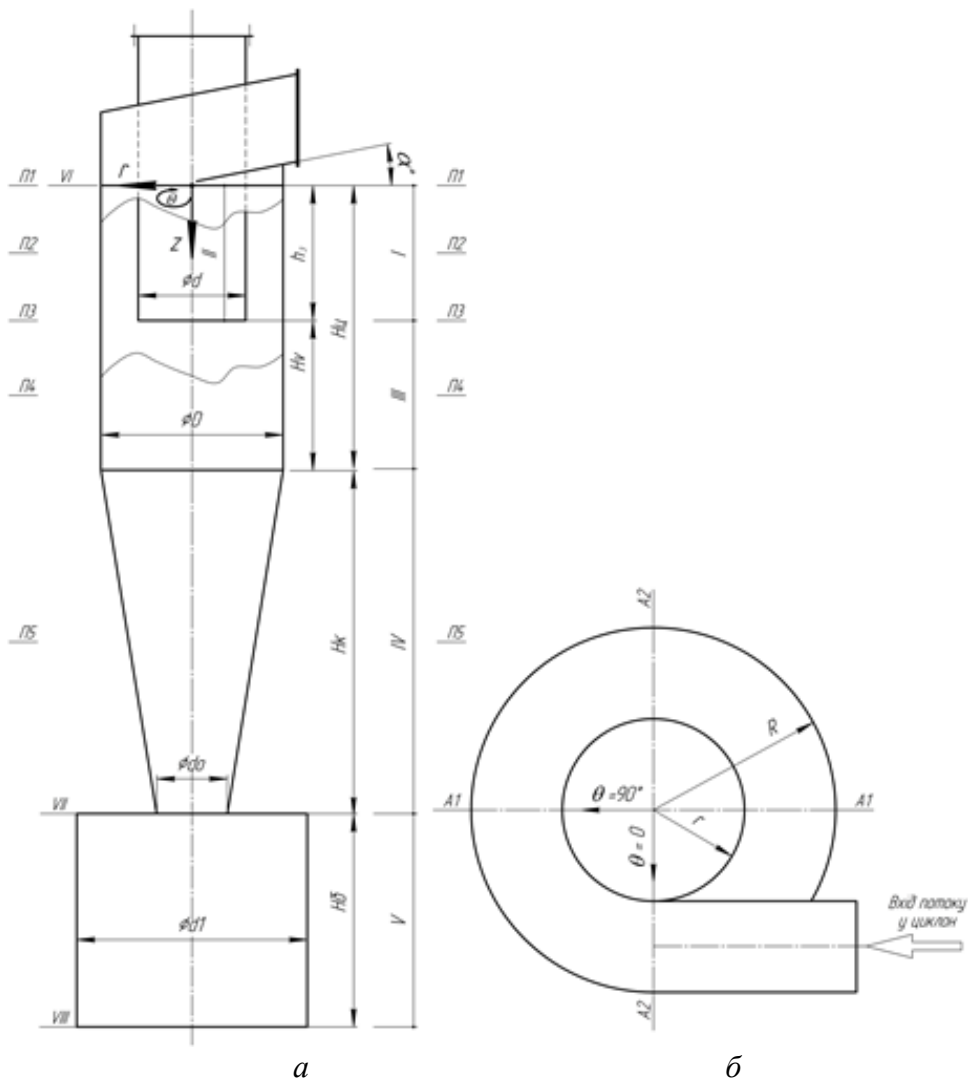


Рис.2.2. Основні ділянки циклона щодо граничних умов
 а – поздовжній ділянки та горизонтальні площини циклона;
 б – площина П1

Швидкість потоку повітря у вхідному патрубку V , як правило, знаходиться у межах $V=17-25$ м/с в залежності від конструкції циклона та технологічних параметрів процесу очищення повітря [8]. Температуру повітря у початковий момент часу вважаємо рівною температурі зовнішнього середовища $T=T_{зс}$, а значення тиску визначається аеродинамічною характеристикою вентилятора [8].

Граничні умови залежать від форми циклона та від особливостей його функціонування. Як приклад, розглянемо найпростіший вид граничних умов – умови прилипання і непроникності потоку повітря на поверхнях і знехтуємо теплообміном між стінками апарата і довкіллям. Вважатимемо також, що статичний тиск на виході з вихлопної труби циклона дорівнює атмосферному (атмосферний тиск при нормальних умовах $p_a = 101325$ Па) [8].

Поверхню циклона можна умовно поділити на п'ять вертикальних (I-V) і 3 горизонтальні (VI-VIII) ділянки.

Ділянка I – простір між вихлопною трубою та циліндричною частиною апарата. Вона обмежена двома циліндричними поверхнями: $r=d/2+0$ та $r=D/2$ де d – діаметр вихлопної труби, D – діаметр циліндричної частини циклона. Величина z може набувати значення з діапазону $(0;h_3)$ [8,16].

$$\text{Тут } V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Ділянка II – простір всередині вихлопної труби: $r=d/2-0, 0 \leq z \leq h_3$.

$$V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Ділянка III – простір, який розміщений між нижнім краєм вихлопної труби та початком конічної частини. Її границя $r = D/2; h_3 \leq z \leq H_{\text{Ц}}$,

$$\text{а граничні умови мають вигляд } V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Ділянка IV – конічна частина апарата. Тут значення r зменшується від $r=D/2$ (при $z=H_{\text{Ц}}$) до $r=d_0/2$ (при $z=H_{\text{Ц}}+H_{\text{К}}$). Тому значення r слід розглядати як функцію від z , а саме,

$$r = \frac{D-d_0}{2H_{\text{К}}} z + \frac{D(H_{\text{К}} + H_{\text{Ц}}) - d_0 H_{\text{Ц}}}{2H_{\text{К}}}, H_{\text{Ц}} \leq z \leq (H_{\text{К}} + H_{\text{Ц}}),$$

$$\text{а граничні умови набувають вигляду } V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$

Ділянка V – бункер. Тут $r = d_1/2; H_{\text{Ц}} + H_{\text{К}} \leq z \leq H_{\text{Ц}} + H_{\text{К}} + H_{\text{б}}$.

$$\text{Граничні умови: } V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

На горизонтальній площині VI (рис. 2. 2): $d/2 < r < D/2; z = 0$;

$$V_{\theta}=V(r) \cos \alpha; V_z=V(r) \sin \alpha; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

При $0 < r < d/2$; і $z=0$ повітряний потік поводитьсья відповідно до закону твердого тіла [4, 8], тобто $V_{\theta} = \omega r$. На основі досліджень, які представлені у роботах [37, 38, 8] будемо вважати V_z сталим у перерізі вихлопної труби, а значення радіальної складової – рівним нулю. Тоді: $V_z = 4Vab/\pi d^2$, де a, b – відповідно довжина і ширина вхідного патрубку

$$\text{циклона і } V_r=0. \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

На горизонтальній площині VII (рис. 2. 1):

$$\frac{d_0}{2} < r < \frac{d_1}{2}; \quad z = H_\kappa + H_\eta; \quad V_\theta=0; \quad V_z=0; \quad V_r=0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

На горизонтальній площині VIII (рис. 2.1):

$$0 < r < \frac{d_1}{2}; \quad z = H_\eta + H_\kappa + H_\sigma; \quad V_\theta=0; \quad V_z=0; \quad V_r=0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

Отже, отримані співвідношення показують повну систему залежностей для дослідження руху повітря в циклоні.

2.2.1 Результати дослідження гідравлічного опору циклона

Для побудови аеродинамічної характеристики сепаратора необхідно знайти значення повного тиску на вході в апарат та на виході з нього при різних значеннях швидкості V потоку у вхідному патрубку. Гідравлічний опір Δp циклона визначають як різницю повних тисків у вхідному патрубку та на виході з вихлопної труби. Фіксували значення Δp при $V = 5 - 28$ м/с. Результати представлені на рисунку 2.3 [8].

Між швидкістю повітря у вхідному патрубку циклона і гідравлічним опором існує нелінійна залежність, це можна побачити при моделюванні. Якщо порівняти отримані значення з експериментальними даними, які представлені у роботах [30, 8], то, наприклад, для швидкості повітря 18 м/с, відповідно до експериментальних даних гідравлічні втрати тиску становлять 764 Па.

За результатами математичного моделювання отримано значення 534 Па. Відхилення можуть бути пояснені явищами турбулентності у реальному потоці, що не враховується у математичній моделі. Характер кривих 1 та 2 є однаковий, тобто запропонована модель в цілому вірно відображає процес циклонування. Перевага запропонованої моделі у порівнянні з іншими моделями, які описані в роботах [31, 32, 33, 34, 15, 8], полягає у тому, що вона враховує форму сепаратора.

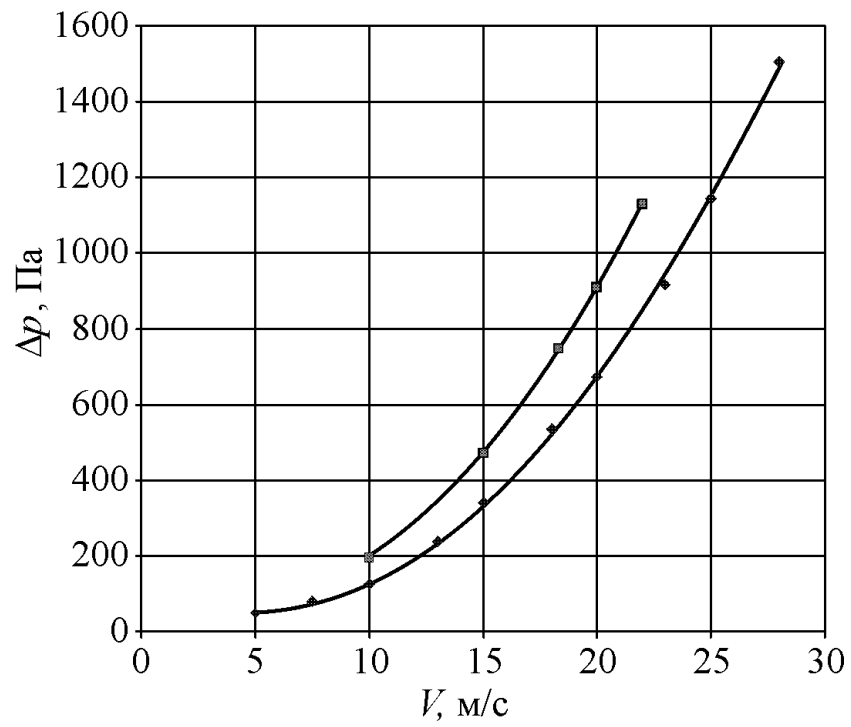


Рис.2.3. Залежність гідравлічного опору циклона від швидкості повітря у вхідному патрубку

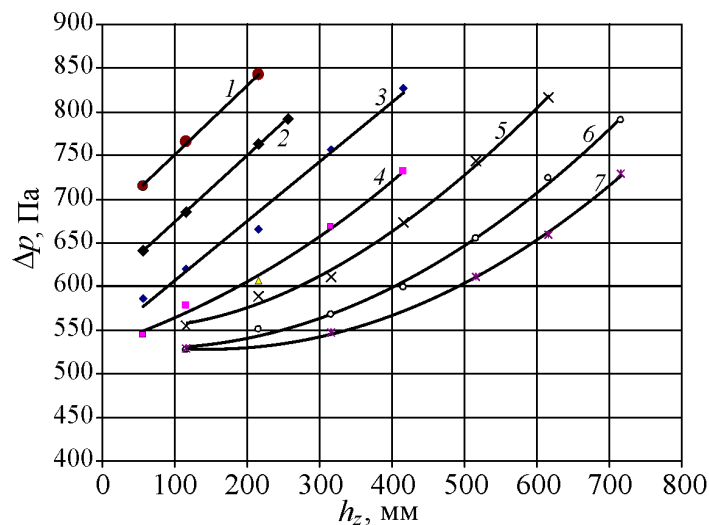
1 – математичне моделювання;

2 – експеримент

2.2.2 Вплив елементів конструкції циклона на його гідравлічний опір

У рамках досліджень розглядалася модель циклона, яка зображена на рисунку 2.2 і досліджувався вплив таких параметрів, як висота циліндричної частини (H_u), глибина занурення вихлопної труби (h_z), висота конічної частини (H_k), діаметр вихлопної труби (d), діаметр пиловипускного патрубку (d_0) на гідравлічний опір циклона. Значення H_u змінювали у діапазоні від 200 мм до 850 мм, значення h_z вибирали з діапазону 56 – 716 мм [8].

На рисунку 2.4 зображено залежність гідравлічного опору циклона від глибини занурення вихлопної труби.



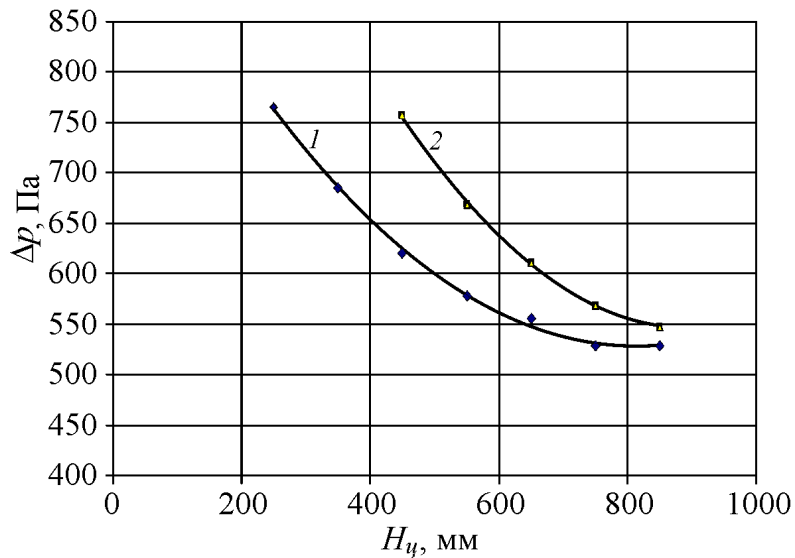
1 – 200 мм; 2 – 250 мм; 3 – 300 мм;

4 – 350 мм; 5 – 400 мм; 6 – 450 мм;

7 – 500 мм

Рис.2. 4. Залежність гідравлічного опору циклона від глибини занурення вихлопної труби при різних висотах циліндричної частини [*]

$$(\rho_{\text{п}}=1,3 \text{ кг/м}^3, T_0 = 20^\circ\text{C}, V=18 \text{ м/с})$$



1 – 116 мм; 2 – 316 мм

Рис.2.5. Залежність гідравлічного опору циклона від висоти циліндричної частини при різних значеннях глибини занурення вихлопної труби [*] ($\rho_n=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $V=18 \text{ м/с}$)

При збільшенні h_z гідравлічний опір апарата зростає. Характер залежності Δp від h_z може бути як лінійним так і нелінійним, та визначається висотою циліндричної частини. Для $H_{ц}$, які є меншими від 350 мм (рис. 2.4, криві 1 – 3), залежність є лінійною. При зростанні висоти циліндричної частини (рис. 2.4, криві 3 – 7) він стає нелінійним [8].

На рисунку 2.5 відображено вплив висоти циліндричної частини циклона на його гідравлічний опір при різних значеннях глибини занурення вихлопної труби.

Збільшення $H_{ц}$ призводить до зменшення гідравлічного опору циклона. Такий висновок на перший погляд виглядає нелогічним, оскільки збільшення $H_{ц}$ приводить до збільшення аеродинамічного шляху, який проходить потік у циклоні, а значить гідравлічний опір апарата мав би зростати. Результати моделювання свідчать про зворотне. Причини зниження гідравлічного опору циклона можна пояснити зміною напрямку потоку повітря та наявністю вторинних потоків у циклоні. Перехід зовнішнього вихору в циклоні у внутрішній відбувається не тільки у конічній частині циклона, але й у циліндричній. Цей процес пов'язаний з перемішуванням потоків, а значить, у значній мірі визначає гідравлічний опір циклона та його ефективність. Зменшення простору, у якому проходить такий поворот приводить до зростання гідравлічного опору апарата. Можна вважати, що при значенні $H_{ц}$, рівному 700 мм, подальше зростання висоти циліндричної частини не приводить до зниження гідравлічного опору циклона [8].

На рисунку 2.6 зображено залежність гідравлічного опору циклона від відстані H_v від нижнього краю вихлопної труби до конічної частини апарата. Обчислення

проводилися для різноманітних значень H_u та h_3 . Так при $H_u=375$ мм, $h_3=225$ мм значення $H_V=150$ мм (рис. 2.5, точка 1) гідравлічний опір циклона складає 729 Па. При збільшенні висоти циліндричної частини вдвічі $H_u=775$ мм (рис. 2.5, точка 2) та $h_3=600$ мм ($H_V=150$ мм) гідравлічний опір апарата зростає тільки на 4,5% і становить 764 Па [8].

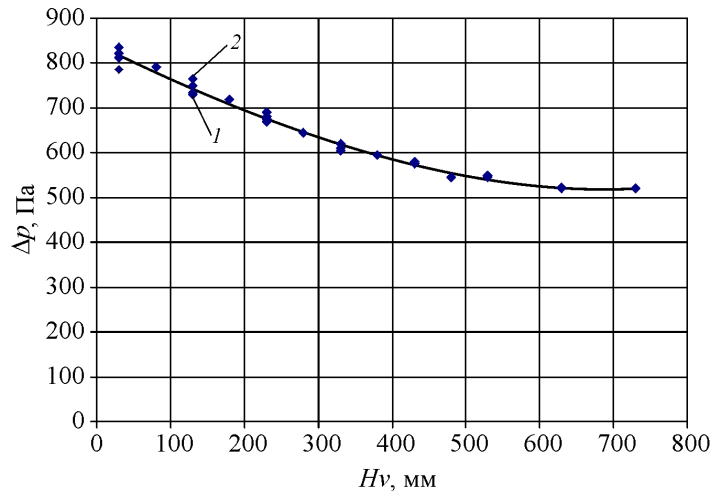


Рис.2.6. Залежність гідравлічного опору циклона від відстані H_V

В результаті проведеного аналізу приходимо до висновку про визначальний вплив відстані від нижнього краю вихлопної труби до конічної частини циклона на гідравлічний опір апарата. Отримані результати дають змогу підтвердити гіпотезу про те, що основну частину гідравлічного опору циклона складають втрати в його середині на енергетичне розсіювання в обертальному потоці, подолання турбулентних завихрень, і тільки незначна частина втрат пов'язана з розширенням потоку на вході, розсіюванням на виході і тертям до стінок циклона [39, 30, 8].

Аналогічним чином збільшення простору для здійснення повороту повітряного потоку можна здійснити шляхом збільшення висоти конічної частини H_K або збільшенням діаметру d_0 пиловипускного отвору. На рисунку 2.7 зображено залежність гідравлічного опору від діаметра пиловипускного отвору [8].

Зі збільшенням значення d_0 гідравлічний опір знижується. Проте зниження Δp не є значним. Зі зростанням d_0 від 50 мм до 200 мм Δp знижується тільки на 5% (від 630 Па до 598 Па). На рисунку 2.7 зображено графічну залежність гідравлічного опору циклона від висоти його конічної частини. Якщо порівняти графічні залежності, представлені на рисунках 2.5 та 2.8, то можемо зробити висновок, що зміна висоти циліндричної частини (рис. 2.5) має більший вплив на гідравлічний опір циклона аніж зміна висоти конічної частини апарата (рис. 2.8). Так при збільшенні H_u на 20 % у порівнянні з рекомендованим значенням (650 мм) гідравлічний опір в циклоні знизиться на 13% в той час, коли зростання H_K на 20% знизить Δp на 3,6%.

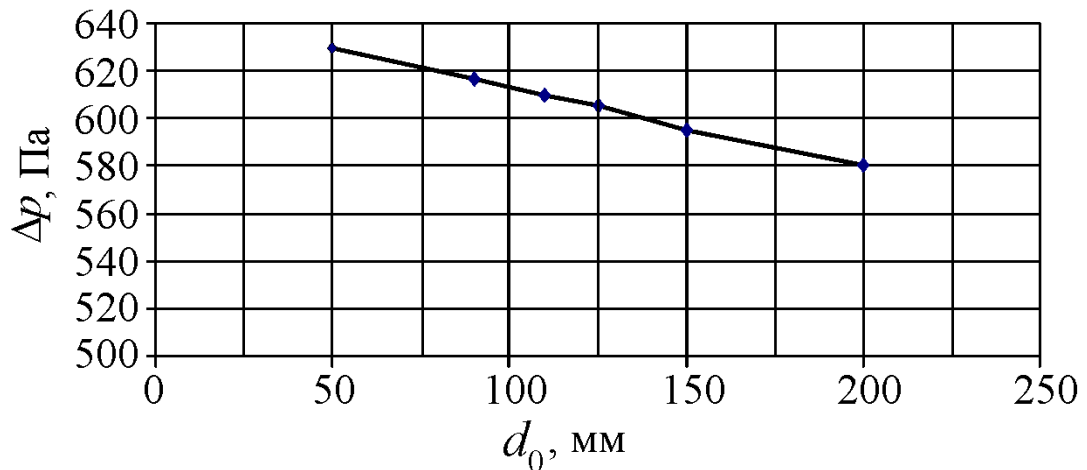


Рис.2.7. Залежність гідравлічного опору циклона від діаметра пиловипускного отвору

З практики [24] відомо, що збільшення висоти конічної частини призводить до підвищення ефективності процесу очищення повітря в циклоні. З іншої сторони збільшення значення H_K та H_C підвищує металосмість конструкції апарата і збільшує його габаритні розміри [53, 55].

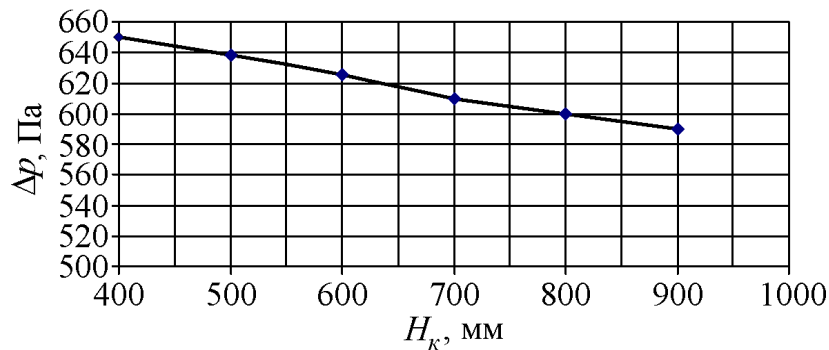


Рис.2.8. Залежність гідравлічного опору від висоти конічної частини

Значний вплив на гідравлічний опір циклона має діаметр його вихлопної труби. При зменшенні значення d гідравлічний опір циклона зростає. При збільшенні діаметра від 90 до 150 мм спостерігаємо різке зниження гідравлічного опору циклона. При діаметрах вихлопної труби 200-260 мм гідравлічний опір циклона практично не знижується. З експериментальних досліджень [24, 35] відомо, що надмірне збільшення d може призводити до того, що на осі вихлопної труби будуть виникати потоки, направлені до середини апарата, що значно знижує ефективність процесу очищення запиленого повітря у циклоні.

Запропоновані рівняння (2.1) – (2.7) дають змогу не тільки дослідити вплив окремих елементів конструкції циклона на гідравлічний опір апарата, а й визначити швидкість потоку всередині пиловловлювача. На аеродинаміку процесу сепарації важливий вплив має не тільки швидкості в точці, але і її тангенціальна та осьова складові.

Внутрішній простір циклона умовно розділили п'ятьма горизонтальними площинами П1 – П5 та двома вертикальними А1 – А2. Будували графічні залежності розподілу швидкості потоку, її тангенціальної та осьової складової на лінії перетину горизонтальної та вертикальної площини. На осі абсцис відкладали відстань L між крайніми стінками циклона. При цьому значення $L=0$ відповідало стінці, яка знаходиться ліворуч, а $L=0,4$ м – праворуч [53, 55].

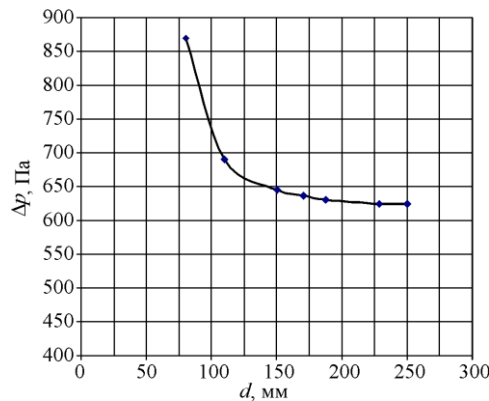


Рис.2.9. Залежність гідравлічного опору від діаметру вихлопної труби

Вісь циклона відповідає значенню $L = 0,2$ м. Отримані результати представлені на рисунках 2.9 – 2.13 [8].

2.2.3 Аналіз руху повітря у циклоні

На рисунку 2.10 зображено графічні залежності швидкості потоку та її складових на лінії перетину площин П1 та А2. В просторі між стінками циклона та вихлопною трубою з боку вхідного патрубку ($L > 3,1$ м) значення швидкості становить 16–17 м/с. Різниця швидкостей є незначним (становить близько 1 м/с) через те, що потік ще не почав інтенсивно обертатися навколо осі апарата. Тут ще проходить перехід від прямолінійного потоку у вхідному патрубку до обертового у циліндричній частині циклона. Після повороту площини на 180° у сепараційній зоні ($L < 0,9$ м) градієнт швидкості є високим (близько 7,5 м/с), що пояснюється теж переходом. Подібний характер зміни має й тангенціальна складова швидкості повітря. Поблизу вхідного патрубку різниця значень складає близько 1 м/с в той час, коли при $L < 0,9$ м вона становить близько 10 м/с. Характер розподілу осьової швидкості повітря теж має значні відхилення від симетричності. Такий самий характер розподілу спостерігається й вздовж прямої перетину площин П1 та А1 (рис. 2.11) [8].

По мірі подальшого обертання та опускання потоку вниз, до площини П2, яка розміщена на вертикальній позиції $z = h_z/2$, різниця швидкостей, у просторі між стінкою та вихлопною трубою, знижується. На рисунку 2. 11 зображено графічні залежності

швидкості потоку та її складових вздовж лінії перетину площин П2 та А2. Характерним для цієї ділянки є й те, що зменшується перепад значень даних величин в сепараційній зоні по різні боки вихлопної труби ($L < 0,9$ м та $L > 3,1$ м) [8]. При значеннях $0,9 \text{ м} < L < 3,1 \text{ м}$ тангенціальна складова швидкості має лінійний характер через прийняте припущення, що на цій ділянці потік поводить себе, як тверде тіло (рис. 2.10 – 2.13).

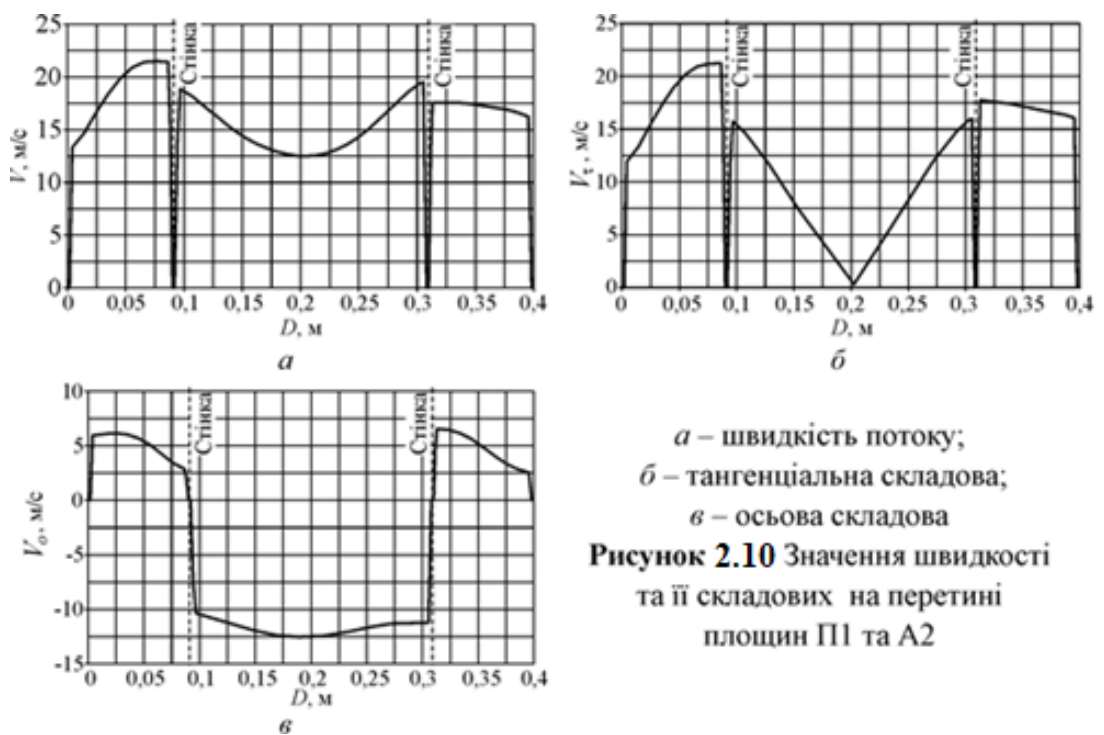
У просторі, який розміщений нижче вихлопної труби, графічні залежності швидкості та її складових можна вважати симетричними (рис. 2.12). Це свідчить про те, що потік стає усталеним. В просторі зовнішнього вихору, який направлений вниз ($L < 0,9$ м та $L > 3,1$ м) тангенціальна складова швидкості повітряного потоку змінюється за законом [15, 20, 40, 21, 8] :

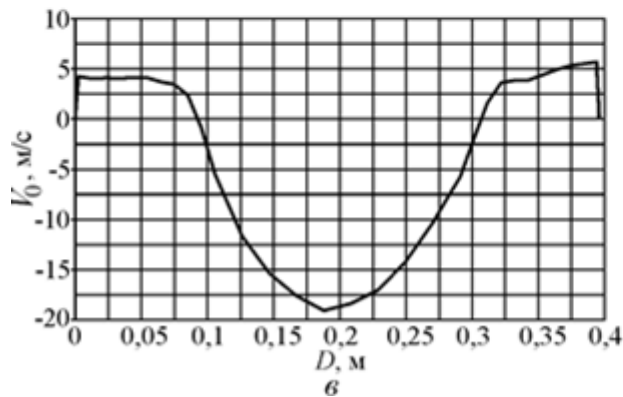
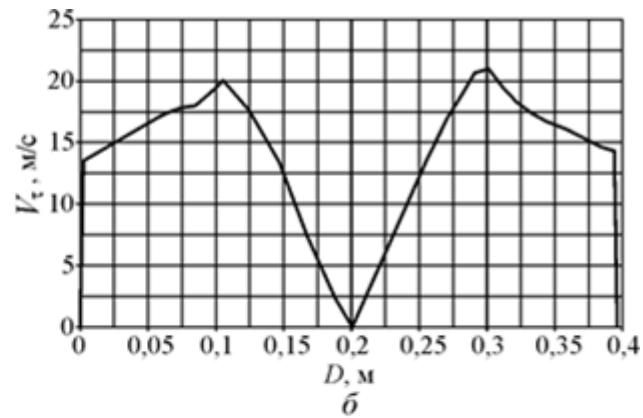
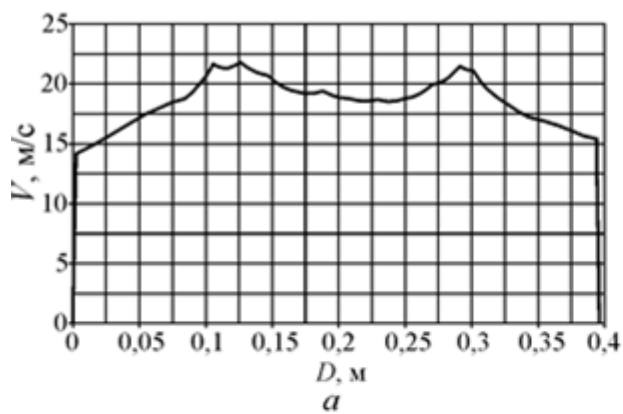
$$V_{\tau} \times R^n = const,$$

де V_{τ} – тангенціальна складова швидкості повітря;

R – відстань від осі циклона до точки заміру швидкості;

n – показник степеню, який є характерним для кожної конструкції циклона та режиму очищення повітря.

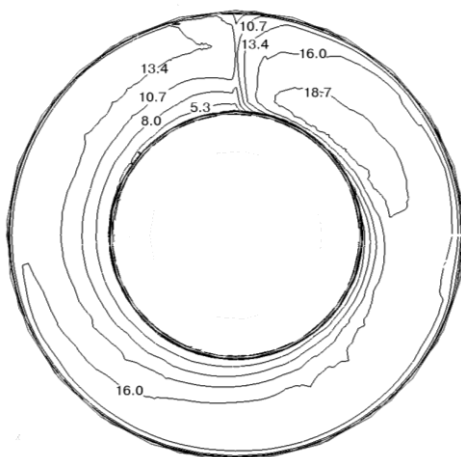




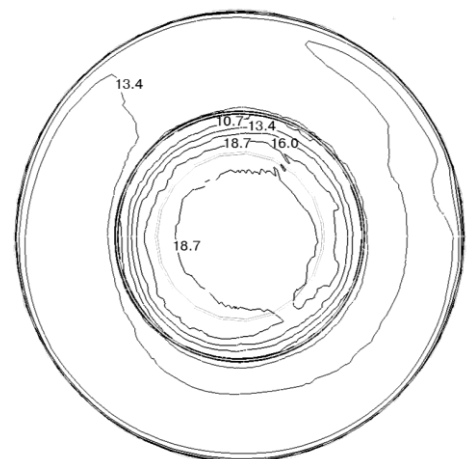
a – швидкість потоку;
b – тангенціальна складова;
c – осьова складова

Рисунок 2.13 – Значення швидкості та її складових на перетині площин ПЗ та А2

Проведені дослідження дали змогу більш чітко зрозуміти аеродинаміку повітряних потоків у циклоні. Через вхідний патрубок потік потрапляє в циліндричний корпус циклона і починає обертатися навколо його осі в проміжку між зовнішньою стінкою та вихлопною трубою [15, 20, 40, 21, 8].



a, *a* – при $z=0$



b, ; *b* – при $z=h_3$

Рис. 2.14. Ізолінії швидкості повітря [53, 55, 8]

Одночасно з обертальним рухом потік здійснює поступальний рух вниз до конічної частини сепаратора. На початку циліндричної частини проходить перехід між прямолінійним потоком у вхідному патрубку та обертальним у циліндричному корпусі

циклона (рис.2.14 та 2.15). Тому в просторі між вихлопною трубою та зовнішньою стінкою циклона розподіл швидкості має значне відхилення від симетричності. Симетричним потік можна вважати тільки у просторі, який розміщений нижче вихлопної труби. Тут тангенціальна швидкість в перерізі циклона описується системою рівнянь [20, 8]:

$$V_{\tau} = \begin{cases} V_{\tau} = \text{const} \times R, & \text{при } 0 < R < a \\ V_{\tau} \times R^n = \text{const} & \text{при } a < R < \frac{D}{2} \end{cases}, \quad (2.14)$$

де D – діаметр циклона; a – відстань від осі циклона до точки, в якій тангенціальна швидкість набуває свого найбільшого значення.

У конічній частині відбувається зміна напрямку потоку. Тут, внаслідок збільшення гідравлічного опору, він здійснює поворот на 180° , переходить у внутрішній потік, продовжуючи обертатись, підіймається і крізь вихлопну трубу виходить в атмосферу. Частина повітряної суміші потрапляє у бункер, де також здійснює поворот на 180° , підіймається і приєднується до вихору, який направлений вгору [15, 20, 40, 21, 8].

2.2.4. Дослідження статичного тиску

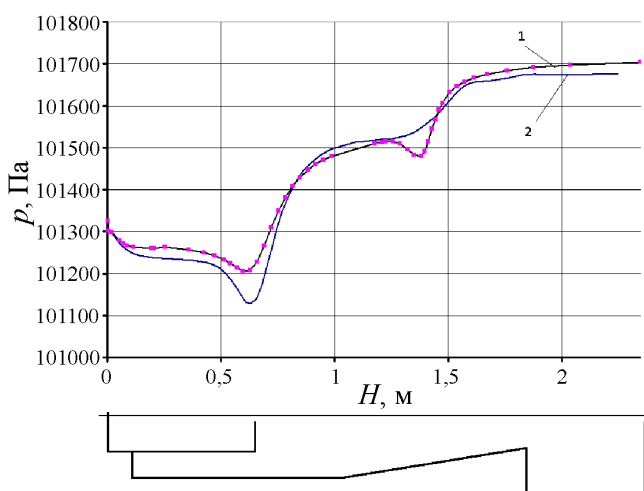
Зміна напрямку потоку супроводжується виникненням градієнту статичного тиску ($\Delta p_{ст}$). Найнижче значення статичного тиску у циклоні спостерігається на осі обертання потоку. У напрямі до зовнішніх стінок величина $\Delta p_{ст}$ зростає. Градієнт статичного тиску має значний вплив на ефективність процесу повітроочищення. При значному перепаді статичного тиску утворюються досить інтенсивні вторинні течії, які направлені від зовнішньої стінки до осі циклона. Найдрібніші частинки пилу (<5 мкм), внаслідок незначної дії відцентрової сили, яка на них діє, захоплюються такими потоками і крізь вихлопну трубу виводяться у атмосферу [15, 20, 40, 21, 8].

На уловлення крупних частинок пилу $\Delta p_{ст}$ теж має значний вплив, оскільки на частинку пилу, яка знаходиться у змінному полі статичного тиску діє сила, протилежна відцентровій. Різкий перепад статичного тиску приводить до турбулізації потоку, що у свою чергу приводить до підвищення гідравлічного опору циклона та зниження його ефективності. Тому при розробленні нових та модернізації існуючих циклонів слід брати до уваги характер розподілу статичного тиску всередині корпусу апаратів. На рисунку 3.17 а–г зображено розподіл статичних тисків повітря вздовж лінії перетину горизонтальних та вертикальних площин [15, 20, 40, 21, 8].

Перепад статичного тиску у просторі між вихлопною трубою і зовнішньою стінкою циклона вздовж лінії перетину площин П1 і А1 (рис. 2.16, а) змінюється від 101780 Па на

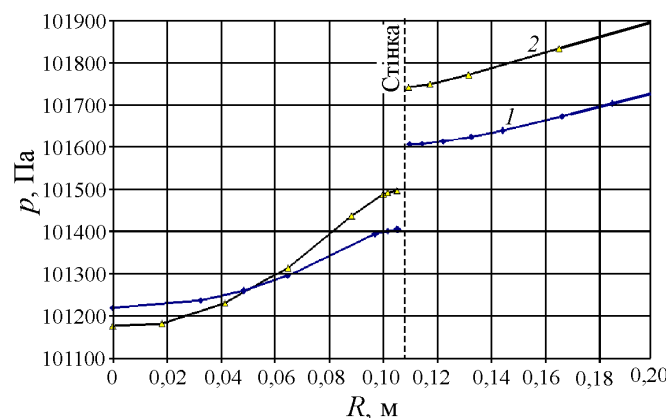
периферії до 101550 Па поблизу вихлопної труби і складає 230 Па. В середині вихлопної труби p_{cm} складає 101410 Па поблизу стінки вихлопної труби та 101250 Па – на осі пиловловлювача. Загальний перепад статичного тиску поблизу зовнішньої стінки апарата та на осі циклона складає 530 Па. По мірі опускання потоку вниз до площини П2 (рис. 2.16, б) перепад статичного тиску в сепараційній зоні зменшується до 145 Па, при цьому він змінюється від 101755 Па до 101610 Па. Відповідно у вихлопній трубі p_{cm} знаходиться у межах 101430 – 101220 Па. Загальний перепад статичного тиску – 535 Па. У просторі, який розміщений нижче вихлопної труби зміна тиску між його значенням поблизу вихлопної труби (101760 Па) та на осі апарата (101180 Па) становить 580 Па (рис. 2.16, в). Відповідний перепад статичного тиску у площині П4 (рис. 2.16, г) становить 560 Па. Максимального значення Δp_{cm} набуває поблизу нижнього краю вихлопної труби. Саме у цьому просторі й спостерігаються найбільш потужні вторинні потоки, які приводять до інтенсивного перемішування внутрішнього та зовнішнього вихорів, що призводить до значного підвищення гідравлічного опору циклона та зниження його ефективності [15, 20, 40, 21, 8].

У рамках досліджень проводився аналіз впливу окремих елементів циклона на розподіл статичного тиску у сепараторі. Вивчався вплив форми конічної частини на розподіл статичного тиску на осі циклона. При виборі тієї чи іншої конструкції конічної частини, слід брати до уваги й умови розвантаження подрібненої деревини у бункер. На рисунку 2.17 зображено розподіл статичного тиску p_{cm} по висоті циклона у випадку застосування традиційного (крива 1) та зворотного (крива 2) конусів [15, 20, 40, 21, 8].



1 – зворотній конус;
2 – традиційний конус

Рис.2.17. Розподіл статичного тиску по осі циклона в апараті зі зворотним



1 – зворотній конус;
2 – традиційний конус

Рис.2.18. Розподіл статичного тиску на проміжку від осі до зовнішньої стінки

традиційним конусом [*]

циклона на рівні середини вихлопної труби в апараті зі зворотним та традиційним конусом [*]

У сепараційній зоні менший перепад статичного тиску (рис. 2.18) спостерігається в циклоні зі зворотним конусом, що мало б створювати більш сприятливі умови для очищення повітря. Ще одним аргументом на користь використання зворотного конуса є висока концентрація пилу у вхідному потоці. В циклонах з традиційним конусом можливим є забивання пиловипускного отвору, в той час як конструкції зі зворотним конусом такої небезпеки позбавлені.

2.3. Розрахунок циклону

Прийmemo наступні вихідні дані для розрахунку циклону:

- 1) кількість газу за робочих умов $Q_p = 1115,1 \text{ м}^3 / \text{год} = 0,309 \text{ м}^3 / \text{с}$;
- 2) щільність газу за робочих умов $\rho_p = 1,0 \text{ кг} / \text{м}^3$;
- 3) динамічна в'язкість газу при робочій температурі $\mu_t = 22,2 * 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
- 4) дисперсний склад пилу, що задається двома параметрами $d_m = 5 \text{ мкм}$ і $\lg \sigma_{ch} = 0,283$;
- 5) запиленість газу $Z_{вх} = 10 \text{ г} / \text{м}^3$;
- 6) щільність частинок $\rho_{год} = 1100 \text{ кг} / \text{м}^3$;
- 7) необхідна ефективність очищення газу $\eta = 80\%$.

Розрахунок циклонів проводиться методом послідовних наближень у наступному порядку:

Прийmemo оптимальну швидкість газу в апараті $\omega_{опт} = 3,5 \text{ м} / \text{с}$.

1. Визначаємо необхідну площу перерізу циклону, м^2 :

$$F = \frac{Q_p}{w_{опт}} = \frac{0,309}{3,5} = 0,088 \quad (2.15)$$

2. Визначаємо діаметр циклону, задаючись кількістю циклонів $N = 1$, м:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785N}} = \sqrt{\frac{0,088}{0,785*1}} = 0,334 \quad (2.16)$$

Діаметр циклону округляємо до значення: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000 мм

У даному випадку $D = 0,35 \text{ м}$.

3. Обчислюємо дійсну швидкість газу в циклоні, $\text{м} / \text{с}$:

$$w = \frac{Q_p}{0,785 * N * D^2} = \frac{0,309}{0,785 * 1 * 0,35^2} = 3,21 \quad (2.17)$$

Швидкість газу в циклоні не повинна відхилятися від оптимальної більш ніж на 15%. У даному випадку відхилення складає 6%, що допустимо.

5. Приймаємо коефіцієнт гідравлічного опору, який відповідає цьому циклону: $\xi = 147$.

До K_1 - поправочний коефіцієнт на діаметр циклону, що визначається за таблицею 2.1:

Таблиця 2.1.

Поправочний коефіцієнт K_1 на вплив діаметра циклона

D, мм	Марка циклона		
	ЦН-11	ЦН-15, ЦН-15 У, ЦН-34	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34 М
15	0,94	0,85	1,0
0	0,96	0,90	1,0
200	0,96	0,93	1,0
300	0,99	1,0	1,0
450	1,0	1,0	1,0
500			

До $K_1 = 0,93$;

K_2 - поправочний коефіцієнт на запиленість газу, що визначається за таблицею 2.2: $K_2 = 0,92$;

Таблиця 2.2.

Поправочний коефіцієнт K_2 на вплив діаметра циклона

Марка циклона	Запиленість газу $C', \text{г/м}^3$						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15		0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15У	1	0,93	0,785	0,92	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,947	0,78	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,98	0,97	0,93	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,99	0,92	0,95	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34 М	1	0,81	0,92	0,91	-	-	-
	1						

До K_3 - коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, що визначається за таблицею 2.3:

Таблиця 2.3.

Поправочний коефіцієнт K_3 на вплив діаметра циклона

Характеристика групового циклона	K_3
Характеристика групового циклона	3
Кругова компоновка, нижнє організоване підведення	6 0
Прямокутна компоновка, циклонні елементи розташовані в одній площині. Відведення із загальної камери чистого газу	3 5
Таке саме, але равликоче відведення із циклонних елементів	2 8
Прямокутна компоновка. Вільне підведення потоку в загальну камеру	6 0

До $3 = 0$

$$\xi = K_1 * K_2 * \xi = 0,92 * 0,93 * 147 = 125,7 \quad (2.18)$$

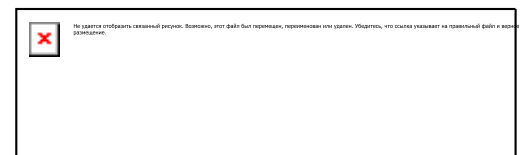
4. Визначаємо втрати тиску в циклоні, Па:

$$\Delta p = \xi \frac{\rho w^2}{2} = 125,7 * \frac{1 * 3,21^2}{2} = 647,61 \quad (2.19)$$

7. Визначаємо значення параметра d_{50} при робочих умовах (діаметр циклону, швидкість потоку, щільність пилу, динамічна в'язкість газу) по рівнянню:

$$d_{50} = d_{50}^T * \sqrt{\frac{D}{D_T} * \frac{\rho_{ч}}{\rho_T} * \frac{\mu}{\mu_T} * \frac{w_T}{w}} = 3.07 \quad (2.20)$$

8. Визначаємо параметр X за формулою:



(2.21)

9. Визначаємо значення $\Phi(X)$, що представляє собою повний коефіцієнт очищення газу, виражений у частках: $\Phi(0,66) = 1.7$

10. Фактична ступінь очищення, %:

$$\eta = 50[1 + \Phi(x)] = 50 * 2,7 = 135 \quad (2.22)$$

Провівши розрахунки, отримано наступні геометричні розміри: Внутрішній діаметр вихлопної труби $d = 0,21$ м;

Внутрішній діаметр пиловипускного отвору $d_1 = 0,105$ м;
 Ширина вхідного патрубку в циклоні (внутрішній розмір) $b = 0,091$ м;
 Ширина вхідного патрубку на вході (внутрішній розмір) $b_1 = 0,231$ м;
 Довжина вхідного патрубку $l = 0,21$ м;
 Діаметр середньої лінії циклону $D_{\text{сер}} = 0,35$ м; Висота установки фланця $h_{\text{фл}} = 0,084$ м;
 Кут нахилу кришки і вхідного патрубку циклону $\alpha = 30^\circ$;
 Висота вхідного патрубку $a = 0,105$ м;
 Висота циліндричної частини циклона $H_{\text{ц}} = 0,791$ м;
 Висота конуса циклону $H_{\text{к}} = 0,7$ м;
 Загальна висота циклону $H = 1,64$ м.

Таблиця 2.4. Технічна характеристика Циклону ЦН-15

Типорозмір циклону	Площа перетину циліндричної частини корпусу (групи корпусів), м ²	Продуктивність, м ³ / год		Робочий об'єм бункера, м ³
		при $V = 3,5$ м / с	при $V = 4$ м / с	
ЦН-15	0,196	1800	2800	0,32

Отже після проведення розрахунків циклону, було отримано технічні характеристики, які наведено в таблиці 2.4.

2.4. Розрахунок ультразвукового кавітатора

Для підвищення ефективності осушення повітря та очищення від дрібного пилу авторами запропоновано застосувати в технологічному обладнанні спеціальний ультразвуковий трубчастий вібратор [52].

В основу розрахунків покладено дослідження ультразвукового кавітатора. У роботах авторів Луговського О.Ф., Мовчанюка А.В., Ткалича В.В., Орешнікова О.В., Гришко І.А., Фесіча В.П., Зілінського А.І., на основі досліджень, запропоновано нову геометрію циклону зі вбудованим ультразвуковим кавітатором. Далі в підрозділі описано розрахунок устаткування, але не наведено конструкцію циклону разом з кавітатором [45, 46-48].

Ультразвукові диспергатори рідини дають можливість отримати дрібнодисперсний аерозоль із заданою формою факела розпилення. Форма факела визначається геометрією розпилюючої поверхні. Для її отримання на кінці ультразвукового трансформатора швидкості створюють потовщення або кріплять додатковий вібраційний елемент. Це може бути кільце, яке забезпечує розпилення рідини своєю бічною поверхнею, що здійснює коливання. Узгоджена робота окремих ділянок коливальні системи диспергатора вимагає виконання розрахунку з урахуванням характеристик застосовуваних матеріалів та інших параметрів [52]. Рівняння позовжніх коливань п'єзоелектричного складеного перетворювача можна записати як [45, 46-48]:

$$S \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(S \frac{\partial U}{\partial x} \right), \quad (2.23)$$

де U - подовжнє переміщення, C - швидкість звуку, S - площа поперечного перерізу. Для перетворювача, що здійснює гармонійні коливання і має деяку власну частоту, рішення рівняння (2.23) може бути отримане у вигляді:

$$U(x, t) = U(x)(P \sin \omega t + Q \cos \omega t).$$

Тоді, для частотознижуючої накладки і прилеглою до неї п'єзокерамічної шайби можна записати відповідно [45, 46-48]:

$$U_1(x, t) = \left(A \cos \frac{\omega}{C_1} x + B \sin \frac{\omega}{C_1} x \right) \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.24)$$

$$\text{і, } U_2(x, t) = \left(C \cos \frac{\omega}{C_2} x + D \sin \frac{\omega}{C_2} x \right) \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.25)$$

де C_1 і C_2 - швидкість звуку в матеріалі накладки і шайби відповідно. Відповідно до розрахункової схеми (рис.2.19) граничні умови для даної коливальної системи з початком координат в точці можна представити у виді [45, 46-48]:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 \\ E_1 S_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} &= E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x=a_2; \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = 0 \text{ при } x=a_1 + a_2; \quad (2.27)$$

$$U_2=0 \text{ при } x=0; \quad (2.28)$$

де a_1, E_1, S_1 и a_2, E_2, S_2 -толщина, модуль пружності на розтягування і площу торцевої поверхні накладки і шайби відповідно. За умови (2.26) з рівняння (2.25) слідує :

$$C=0. \quad (2.29)$$

Тоді можна записати

$$U_2(x,t) = D \sin \frac{\omega}{C_2} x \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.30)$$

Умова (2.27) дозволяє з рівняння (2.24) записати рівність

$$B \cos \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2) = A \sin \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2).$$

Звідки
$$B = A \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2). \quad (2.31)$$

Підставивши (31) в рівняння (24), отримаємо

$$U_1(x,t) = \left[\cos \frac{\omega}{C_1} x + \sin \frac{\omega}{C_1} x \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2) \right] \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.32)$$

Перша половина граничної умови (6) дає можливість з урахуванням рівнянь (2.30) і (2.32) записати [45, 46-48]:

$$D \sin \frac{\omega}{C_2} a_2 = A \left[\cos \frac{\omega}{C_1} a_2 + \sin \frac{\omega}{C_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2) \right]$$

Звідки
$$D = \frac{A}{\sin \frac{\omega}{C_2} a_2} \left[\cos \frac{\omega}{C_1} a_2 + \sin \frac{\omega}{C_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2) \right] \quad (2.33)$$

З урахуванням другої половини граничної умови (2.28) після диференціювання рівнянь (2.30) і (2.32) буде справедливий запис [45, 46-48]:

$$E_1 S_1 \frac{A}{C_1} \left[\cos \frac{\omega}{C_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2) - \sin \frac{\omega}{C_1} a_2 \right] = E_2 S_2 \frac{D}{C_2} \cos \frac{\omega}{C_2} a_2 \quad (2.34)$$

Спільне рішення рівнянь (11) і (12) дозволяють

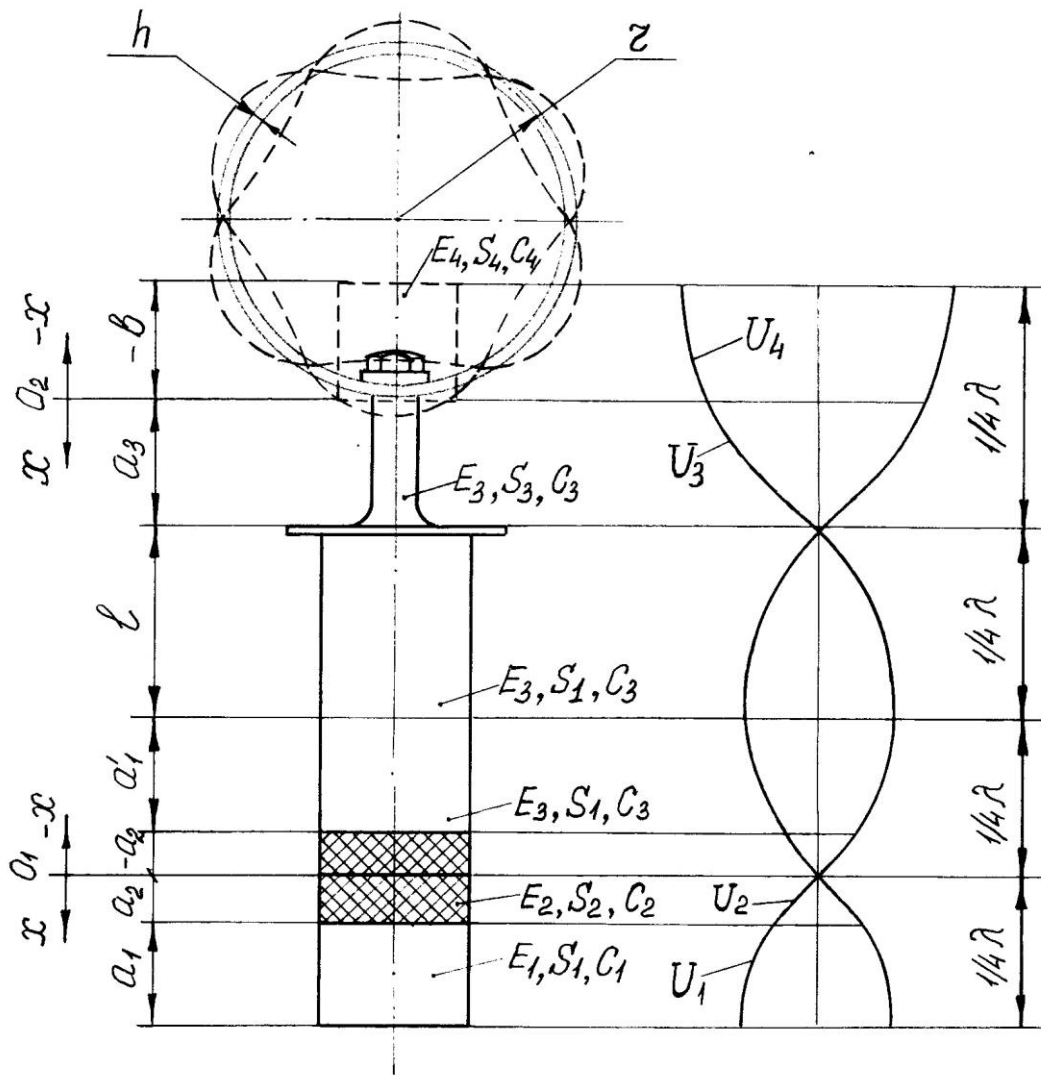
отримати
$$\frac{E_1 S_1 C_2}{E_2 S_2 C_1} = \frac{\operatorname{ctg} \frac{\omega}{C_2} a_2 \left[\cos \frac{\omega}{C_1} a_2 + \sin \frac{\omega}{C_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2) \right]}{\cos \frac{\omega}{C_1} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + a_2) - \sin \frac{\omega}{C_1} a_2}.$$

(2.35)

Рішення рівняння (2.35) відносно a 1 дає

$$\text{вираження } a_1 = \frac{C_1}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_2 S_2 C_1 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{C_2} a_2 + E_1 S_1 C_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} a_2}{E_1 S_1 C_2 - E_2 S_2 C_1 \operatorname{ctg} \frac{\omega}{C_2} a_2 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} a_2} - a_2. \quad (2.36)$$

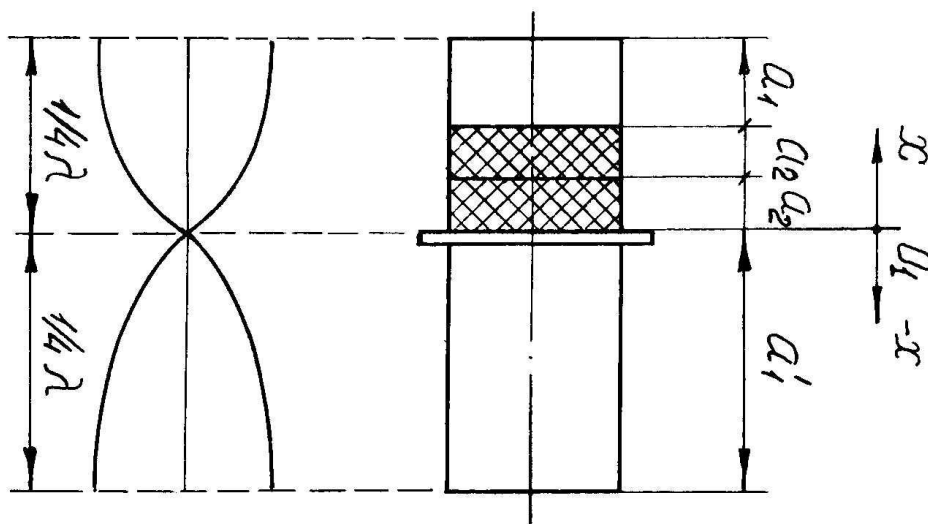
З врахуванням $\omega = 2\pi f$, де f - частота коливань генератора збудження, рівняння (2.36) дозволяє розрахувати довжину накладки при заданих параметрах її матеріалу і вибраному типорозміру шайби. Іноді конструктивні міркування змушують зміщувати точку можливого кріплення складеного п'єзоелектричного перетворювача, використовуючи при цьому несиметричний складений п'єзоелектричний перетворювач



(рис.2.20).

Рис.2.19. Розрахункова схема 1-хвильового ультразвукового диспергатора з симетричним п'єзоелектричним складеним [45, 46-48]

Ця необхідність виникає, наприклад, при створенні 3/4-волнового (рис.2.20. складений п'єзоелектричний перетворювач ультразвукового диспергатора), що дозволяє зменшити



габарити конструкції і що має одну вузлову точку кріплення. В даному випадку для малої частотопонижающей накладки вираз (2.36) [45, 46-48].

Рис.2.20. Складений п'єзоелектричний перетворювач ультразвукового диспергатора

$$a_1 = \frac{C_1}{\omega} \arctg \frac{E_2 S_2 C_1 ctg \frac{\omega}{C_2} 2a_2 + E_1 S_1 C_2 tg \frac{\omega}{C_1} 2a_2}{E_1 S_1 C_2 - E_2 S_2 C_1 ctg \frac{\omega}{C_2} 2a_2 tg \frac{\omega}{C_1} 2a_2} - 2a_2 \quad (2.37)$$

Якщо в рівняння (2.37) покласти $a_2=0$, отримаємо

$$a_1 = \frac{C_1 (2n-1)}{\omega} \pi$$

Виходячи з цього, для більшої накладки згідно з розрахунковою схемою рис.2.20 можна записати [45, 46-48]:

$$a_1' = \frac{C_3 (2n-1)}{\omega} \pi \quad \text{або при } n=1 \quad a_1' = \frac{C_3}{4f} \quad (2.38)$$

Для розрахунку ультразвукового трансформатора швидкості, роль якого в даній схемі виконує ступінчастий концентратор, скористаємося загальною формою рівняння подовжніх коливань (2.23). Оскільки і в даному випадку справедливе допущення про

те, що концентратор має власну частоту і здійснює гармонійні коливання, рішення рівняння (2.23) можна надати у виді [45, 46-48]:

$$U_3(x, t) = (A \cos \frac{\omega}{C_3} x + B \sin \frac{\omega}{C_3} x) \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.39)$$

Тут, з метою спрощення, приймемо, що концентратор коливань і прилегла до нього накладка п'єзоелектричного перетворювача виконані з одного матеріалу. Зазвичай, вони для зменшення втрат і виконуються як одно ціле. Аналогічно, для циліндра, еквівалентного по масі торцевому потовщенню концентратора з поверхнею, що розпиляла, забезпечує формування заданої форми аерозольного факела, або кільцевому вібратору, що розпиляв, з елементами його кріплення до концентратора коливань, можна записати, як [45, 46-48]:

$$U_4(x, t) = (C \cos \frac{\omega}{C_4} x + D \sin \frac{\omega}{C_4} x) \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.40)$$

де C_4 - швидкість звуку в матеріалі циліндра, еквівалентного по масі розпилюючого елемента. Граничні умови для коливальної системи з початком координат в точці O_2 можуть бути записані як [45, 46-48]:

$$U_3 = 0 \text{ при } x = a_3; \quad (2.41)$$

$$\left. \begin{aligned} U_3 &= U_4 \\ E_3 S_3 \frac{\partial U_3}{\partial x} &= E_4 S_4 \frac{\partial U_4}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x=0; \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial U_4}{\partial x} = 0 \text{ при } x=b, \quad (2.43)$$

де E_4 - модуль пружності на розтягуванні матеріалу розпилюючого елемента, наприклад, кільцевого вібратора; S_3 і S_4 - площі поперечного перерізу малого по діаметру ступеня концентратора і еквівалентного циліндра відповідно; a_3 - довжина ступеня малого діаметру концентратора; b - висота еквівалентного циліндра. За умови (2.41) з рівняння (2.39) отримаємо [45, 46-48]:

$$A \cos \frac{\omega}{C_3} a_3 = -B \sin \frac{\omega}{C_3} a_3;$$

$$B = - \frac{A}{\operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_3}. \quad (2.42)$$

Враховуючи першу частину умови (2.42), з рівнянь (2.39) і (2.40) отримаємо [45, 46-48]:

$$A=C. \quad (2.45)$$

Друга частина умови (2.42) може бути перетворена до виду

$$E_3 S_3 C_4 B = E_4 S_4 C_3 D. \quad (2.46)$$

Умова (2.43) дозволяє з рівняння (2.40) отримати

$$-C \sin\left[\frac{\omega}{C_4}(-b)\right] + D \cos\left[\frac{\omega}{C_4}(-b)\right] = 0.$$

Звідки
$$D = -C \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_4} b. \quad (2.47)$$

Тоді з обліком (2.46), можна записати

$$\frac{A}{\operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_3} E_3 S_3 C_4 = C E_4 S_4 C_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_4} b$$

чи, враховуючи рівність (2.45), отримаємо [45, 46-48]:

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_4} b = \frac{E_3 S_3 C_4}{E_4 S_4 C_3}. \quad (2.48)$$

можна записати

$$a_3 = \frac{C_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_3 C_4}{E_4 S_4 C_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_4} b}. \quad (2.49)$$

Довжину ступеня більшого діаметру концентратора визначимо з вираження (2.49), враховуючи, що, у разі відсутності на кінці ступінчастого концентратора навантаження у вигляді кільцевого вібратора або іншого розпилювача $b=0$ та $a_3 = l$ [45, 46-48]:

$$l = \frac{C_3}{\omega} \frac{(2n-1)\pi}{2}. \quad (2.50)$$

Для трансформатора швидкості з 1/2-волновою акустичною системою, коли довжина одного ступеня рівна $1/4 \lambda$ и $n=1$,

маємо
$$l = \frac{C_3}{\omega} \frac{\pi}{2}, \text{ або } l = \frac{C_3}{4f}. \quad (2.51)$$

Частота радіально-вигинистих коливань кільця за умови, що розміри його поперечного перерізу малі в порівнянні з радіусом r центральної лінії перерізу, може бути описана залежністю [2] [45, 46-48]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_4 I^2}{F r^4 \rho} \frac{i^2 (1-i^2)^2}{(1+i^2)}}, \quad (2.52)$$

де - I - осьовий момент інерції поперечного перерізу кільця; ρ - щільність матеріалу кільця; i - число півхвиль, розташованих по довжині кола кільця; F - площа поперечного перерізу кільця.

Враховуючи залежності $C_4 = \sqrt{\frac{E_4}{\rho}},$

$$I = \frac{Hh^3}{12} \text{ и } F = Hh,$$

де h і H - товщина і висота поперечного перерізу кільця, отримаємо [45, 46-48]:

$$f = \frac{1}{2r^2 \pi} C_4 \frac{h}{\sqrt{12}} K \quad (2.53)$$

Або $r = \sqrt{\frac{1}{2f\pi} C_4 \frac{h}{\sqrt{12}} K}, \quad (2.54)$

де $K = \sqrt{\frac{i^2(1-i^2)^2}{1+i^2}}.$

i	4	5	6	7	8	9	10
K	14,55	23,53	34,52	47,51	62,51	79,51	98,50
	3	4	2	8	6	4	7

При $I=0$ радіально вигинисті коливання в кільці відсутні і воно рухається як єдина маса. Об'єм тіла вібратора можна представити залежністю [45, 46-48]:

$$V = 2rhH\pi, \quad (2.55)$$

а його масу виразити як

$$m_k = \frac{E_4 2rhH\pi}{C_4^2}. \quad (2.56)$$

Тоді повна маса кільцевого вібратора, що враховує наявність елементів кріплення кільця до торця концентратора, може бути записана як [45, 46-48]:

$$m = \frac{E_4 2rhH\pi}{C_4^2} + m_{крп}, \quad (2.57)$$

де $m_{кр\text{еп}}$ -маса кріпильних елементів.

Аналогічно, для циліндра, еквівалентного по масі конструктивним елементам розпилювача можна записати [45, 46-48]:

$$m' = \frac{E_4}{C_4^2} S_4 b . \quad (2.58)$$

Прирівнюючи вирази (2.57) і (2.58), отримаємо:

$$b = \frac{(E_4/C_4^2)2rhH\pi + m_{кр\text{еп}}}{(E_4/C_4^2)S_4} . \quad (2.59)$$

Якщо елементи кріплення кільцевого розпилювача виконані з того ж матеріалу, що і саме кільце, вираження (2.59) спроститься і прийме вид [45, 46-48]:

$$b = \frac{2rhH\pi + V_{кр\text{еп}}}{S_4} , \quad (2.60)$$

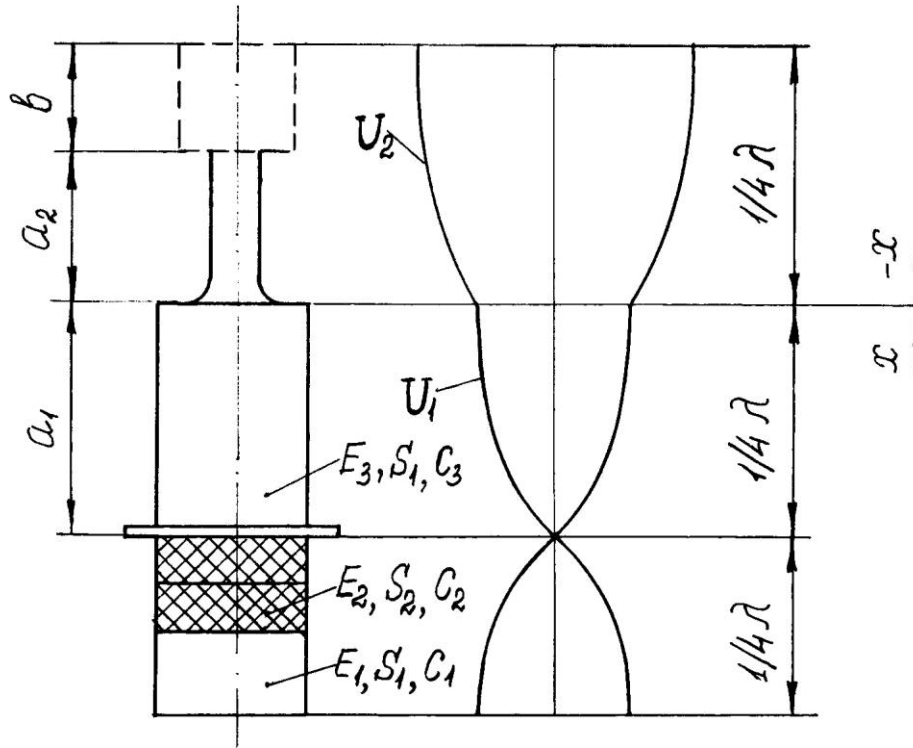
де $V_{кр\text{еп}}$ - об'єм тіла елементів кріплення.

При $i \neq 0$ навантаженням для ультразвукового трансформатора швидкості є тільки частина кільцевого вібратора, визначається радіально-вигинистою півхвилею. Тоді вираження (2.59) скоректується і в першому наближенні може бути записано як [45, 46-48]:

$$b = \frac{2\pi rhH/i + V_{кр\text{еп}}}{S_4} . \quad (2.61)$$

б) 3/4-волнової ультразвуковий диспергатор

Коливальна система такого диспергатора має одну можливу точку кріплення, що дозволяє зменшити подовжній розмір диспергатора на 1/4 акустичних хвилі. Для можливості жорсткого кріплення п'єзоелектричний складений перетворювач в такій схемі зазвичай виконують несиметричним (рис.3). При цьому ступінь меншого діаметру трансформатора швидкості з розпоршувальним вібратором підключається безпосередньо в пучності коливань, що доводиться на торець складеного перетворювача. Тому цей ступінь слід розглядати в якості навантаження до п'єзоелектричного перетворювача, що накладає особливості на розрахунок однієї з його частотознижуючих накладок [45, 46-48].



Для випадку гармонійних коливань диспергатора згідно з розрахунковою схемою (рис.2.21) рішення загального рівняння (2.23) подовжніх коливань можна записати у виді.

$$U_1(x, t) = \left(A \cos \frac{\omega}{C_3} x + B \sin \frac{\omega}{C_3} x \right) \sin(\omega t + j) \quad (2.62)$$

$$U_2(x, t) = \left(C \cos \frac{\omega}{C_3} x + D \sin \frac{\omega}{C_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi) .$$

(2.63)

Рис.2.21. Розрахункова схема 3/4-хвильового ультразвукового диспергатора

Граничні умови відповідно до розрахункової схеми можна представити як

$$U_1 = 0 \text{ при } x = a_1 ; \quad (2.64)$$

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 \\ E_3 S_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} &= E_3 S_3 \frac{\partial U_2}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x=0 ; \quad (2.65)$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial x} = 0 \text{ при } x = -(a_2 + b) . \quad (2.66)$$

Умова (2.64) дає можливість з рівняння (2.62) отримати

$$A \cos \frac{\omega}{C_3} a_1 + B \sin \frac{\omega}{C_3} a_1 = 0 \quad \text{або}$$

$$A = -B \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_1. \quad (2.67)$$

З урахуванням рівності (2.67) рівняння (2.62) переписеться у виді [45, 46-48]:

$$U_1(x, t) = B \left(\sin \frac{\omega}{C_3} x - \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_1 \cos \frac{\omega}{C_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.68)$$

Умова (2.68) дозволяє записати

$$C \sin \frac{\omega}{C_3} (a_2 + b) + D \cos \frac{\omega}{C_3} (a_2 + b) = 0 \quad \text{або}$$

$$D = -C \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} (a_2 + b) = 0. \quad (2.69)$$

З урахуванням рівності (2.69) рівняння (2.63) набуде вигляду

$$U_2(x, t) = C \left[\cos \frac{\omega}{C_3} x - \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} (a_2 + b) \sin \frac{\omega}{C_3} x \right] \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.70)$$

Перша половина граничної умови (2.65) дозволяє з рівнянь (2.68) і (2.70) отримати [45, 46-48]:

$$\frac{B}{C} = - \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_1}. \quad (2.71)$$

Друга половина умови (2.65) після диференціювання рівнянь (2.68) і (2.70) дозволяє записати

$$\frac{B}{C} = - \frac{S_3}{S_1} \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} (a_2 + b). \quad (2.72)$$

Прирівнюючи рівність (2.71) і (2.72) отримаємо

$$\operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_1 = \frac{S_1}{S_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} (a_2 + b)}. \quad (2.73)$$

Звідки маємо шукане вираження [45, 46-48]:

$$a_1 = \frac{C_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{S_1}{S_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} (a_2 + b)}. \quad (2.74)$$

Величини a_2 і b визначаються по раніше отриманих формулах (2.49) і (2.60).

в) 1/2-хвильовий ультразвуковий диспергатор

Мінімальні габарити конструкції диспергатора дозволяє забезпечити застосування 1/2-хвильової акустичної системи (рис.2.22). Для такої, що здійснює гармонійні коливання, системи рішення загального рівняння (2.23) подовжніх коливань можуть бути записані як

$$U_1(x,t) = \left(A \cos \frac{\omega}{C_1} x + B \sin \frac{\omega}{C_1} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \quad (2.75)$$

$$U_2(x,t) = \left(C \cos \frac{\omega}{C_2} x + D \sin \frac{\omega}{C_2} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \quad (2.76)$$

$$U_3(x,t) = \left(Q \cos \frac{\omega}{C_3} x + G \sin \frac{\omega}{C_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi); \quad (2.77)$$

Граничні умови для коливальної системи відповідно до розрахункової схеми рис.2.22 представимо у виді [45, 46-48]:

$$U_3 = 0 \text{ при } x = -a_3; \quad (2.78)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_3 \\ E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= E_3 S_1 \frac{\partial U_3}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x=0; \quad (2.79)$$

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= U_1 \\ E_2 S_2 \frac{\partial U_2}{\partial x} &= E_1 S_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{ при } x=2 a_2; \quad (2.80)$$

$$\frac{\partial U_1}{\partial x} = 0 \text{ при } x = a_1 + 2 a_2. \quad (2.81)$$

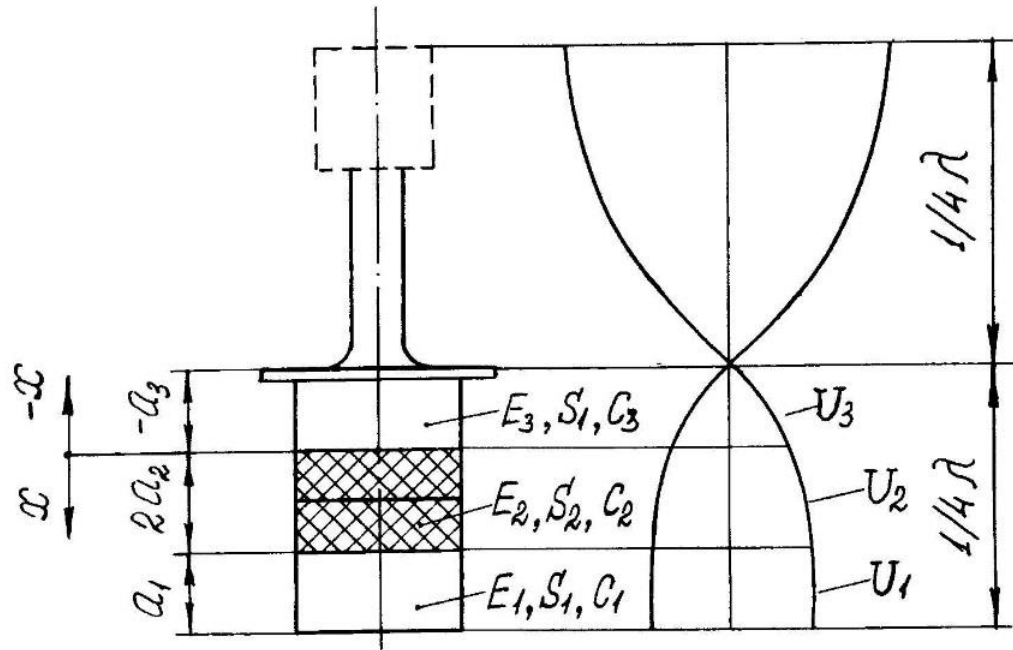


Рис.2.22. Розрахункова схема 1/2-хвильового ультразвукового диспергатора.

Облік умови (2.88) дозволяє з рівняння (2.77) отримати [45, 46-48]:

$$Q \cos \frac{\omega}{C_3} a_3 = G \sin \frac{\omega}{C_3} a_1 \quad \text{або} \quad Q = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_3 . \quad (2.82)$$

При цьому рівняння (2.77) набере вигляду

$$U_3(x, t) = G \left(\sin \frac{\omega}{C_3} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_3 \cos \frac{\omega}{C_3} x \right) \sin(\omega t + \varphi) . \quad (2.83)$$

Перша половина граничної умови (2.79) дозволяє з рівнянь (2.76) і (2.83) отримати

$$C = G \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_3 . \quad (2.84)$$

Друга половина умови (2.79) після диференціювання рівнянь (2.76) і (2.83) дозволяє записати

$$E_2 S_2 \frac{D}{C_2} = E_3 S_1 \frac{G}{C_3} \quad \text{або} \quad \frac{D}{G} = \frac{E_3}{E_2} \frac{S_1 C_2}{S_2 C_3} . \quad (2.85)$$

Тоді спільне рішення (2.84) і (2.85) дозволяє отримати

$$\frac{D}{C} = \frac{E_3}{E_2} \frac{S_1 C_2}{S_2 C_3 \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_3} a_3} . \quad (2.86)$$

Гранична умова (2.81) приводить рівняння (2.75) до рівності

$$B = A \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + 2a_2) \quad (2.87)$$

З обліком (2.87) рівняння (2.75) перепишемо у виді

$$U_1(x, t) = A \left[\cos \frac{\omega}{C_1} x + \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{C_1} x \right] \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.88)$$

Облік першої половини умови (2.80) приводить рівняння (2.86) і (2.88) до виду

$$C \left(\cos \frac{\omega}{C_2} 2a_2 + \frac{D}{C} \sin \frac{\omega}{C_2} 2a_2 \right) = A \left[\cos \frac{\omega}{C_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{C_1} 2a_2 \right]. \quad (2.89)$$

Друга половина граничної умови (2.80) дозволяє після диференціювання записати рівність (2.90)

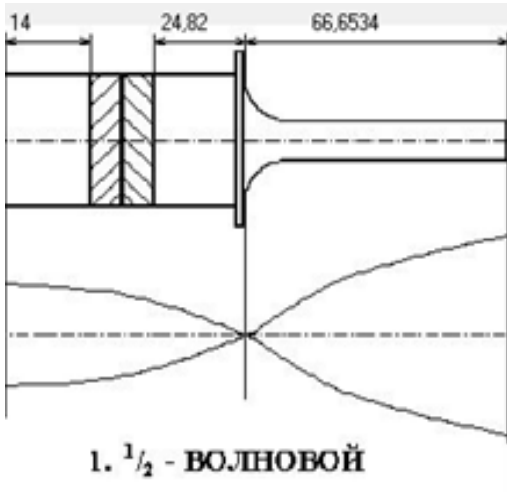
$$C \left(\frac{D}{C} \cos \frac{\omega}{C_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{C_2} 2a_2 \right) = A \frac{E_1 S_1 C_2}{E_2 S_2 C_1} \left[\operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{C_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{C_1} 2a_2 \right]. \quad (2.90)$$

Розділивши рівність (2.89) і (2.90) і враховуючи співвідношення (64) після перетворень отримаємо початкове вираження

$$a_3 = \frac{C_3}{\omega} \operatorname{arctg} \frac{E_3 S_1 C_2 (Z \cos \frac{\omega}{C_2} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{C_2} 2a_2)}{E_2 S_2 C_3 (Z \sin \frac{\omega}{C_2} 2a_2 + \cos \frac{\omega}{C_2} 2a_2)}, \quad (2.91)$$

$$\text{де } Z = \frac{E_2 S_2 C_1 [\cos \frac{\omega}{C_1} 2a_2 + \operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + 2a_2) \sin \frac{\omega}{C_1} 2a_2]}{E_1 S_1 C_2 [\operatorname{tg} \frac{\omega}{C_1} (a_1 + 2a_2) \cos \frac{\omega}{C_1} 2a_2 - \sin \frac{\omega}{C_1} 2a_2]}.$$

Отримані формули дозволяють визначити акустичні розміри елементів конструкцій ультразвукових диспергаторів з урахуванням їх узгодження з навантаженням. Розміри



Модуль пружості матеріала частотопонижаючої накладки.....	20.24	$\cdot 10^4$ МПа
Скорість звука в матеріалі частотопонижаючої накладки.....	5039	м/с
Діаметр частотопонижаючої накладки.....	51	мм
Желательная товщина накладки.....	14	мм
Модуль пружості пьезокерамики.....	6.3	$\cdot 10^4$ МПа
Скорість звука в пьезокерамике.....	2005	м/с
Наружний діаметр пьезокерамической шайбы.....	50	мм
Внутренний діаметр пьезокерамической шайбы.....	20	мм
Толщина пьезокерамической шайбы.....	6	мм
Модуль пружості матеріала концентратора.....	20.24	$\cdot 10^4$ МПа
Скорість звука в матеріалі концентратора.....	5039	м/с
Діаметр большой ступени концентратора.....	51	мм
Частота возбуждения ультразвукового преобразователя.....	18900	Гц
Внутренний діаметр частотопонижаючої накладки.....	14	мм
Кількість пьезокерамических шайб.....	2	
Матеріал концентратора:	Матеріал частотопонижаючої накладки:	Марка пьезокерамики:
Сталь 12Х18Н9Т	Сталь 12Х18Н9Т	APC-841

елементів зображені на рис.2.23 [45, 46-48].

Рис.2.23. Акустичні розміри елементів

2.5.Висновки

1. Представлено математичну модель руху пило-повітряної суміші в циклоні, яка заснована на рівняннях Нав'є-Стокса, рівняннях нерозривності, рівняннях стану і балансу тепла.
2. На основі аналізу моделі встановлено вплив окремих елементів циклона на його експлуатаційні характеристики, характер розподілу швидкості повітря та значення статичного тиску всередині пиловловлювача. Розраховано габаритні розміри циклону та виявлені його технічні характеристики відповідно до його геометрії.
3. Теоретично обґрунтовано та розраховано ультразвуковий кавітатор, який здатний виконувати функції осушувача за рахунок виділення вологи з потоку вхідного повітря [45, 46-48].

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЦИКЛОНІВ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Сучасні пилоочисні установки на основі роботи циклонів, які найчастіше застосовуються в різних галузях промисловості, характеризуються досить високою ефективністю та значними енергетичними затратами на процес очищення. Розроблення нових конструкцій циклонів пов'язано зі збільшенням гідравлічного опору обладнання такого типу [8].

Однією з основних проблем під час проектування нових пилоочисних апаратів із відцентровою зоною розділення будь-якого типу – це не можливість точно визначити ефективність вловлювання пилу та гідравлічний опір [8].

Розрахунок ефективності зазвичай проводять, на основі спрощених математичних моделей, які в більшості випадків спотворюють реальну картину процесу сепарації, що відбувається в робочій зоні циклона. Експериментальні дослідження із визначення поля швидкостей взагалі важко реалізувати внаслідок складності конструкції апаратів та відсутності надійних та доступних вимірювальних приладів і методик розрахунку [8].

Втрати тиску переважно визначають експериментальним шляхом у лабораторних умовах залежно від конструктивних особливостей апарата, фіктивної швидкості та технологічних параметрів [8].

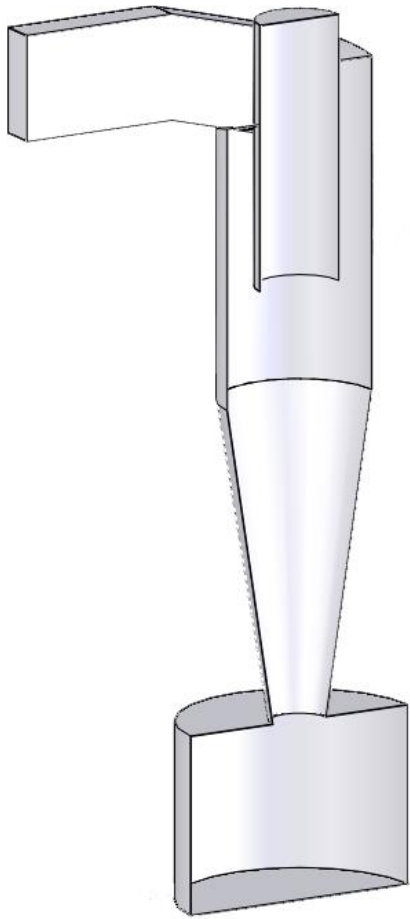
Поставлена проблема в науково-дослідній роботі можна вирішити засобами комп'ютерного моделювання руху газопилових потоків у робочій зоні циклона та вивченням роботи апарата [8].

Для вдосконалення розрахунку аеродинамічних характеристик та процесу пиловловлювання в робочій зоні циклонів різних конструкцій з метою прогнозування їх основних робочих характеристик використовують такі програмні комплекси: SolidWorks фірми DSS SolidWorks Corp., Ansys фірми Ansys Inc., FlowVision фірми Tecis й ін. У роботі [3] за допомогою ПК SolidWorks Flow Simulation.

3.1.Результати досліджень руху повітря за нормальних умов

Спираючись на отримані результати досліджень Л.М. Дорундяк було проаналізовано моделювання циклону ЦН-15. Далі в даному підрозділі було розглянуто безпосередньо модель циклону, рух повітря в ньому та наведено гідравлічний опір. Але даного дослідження не достатньо для вирішення поставленої задачі магістерської дисертації. Тому вже в наступному підрозділі було розглянуто моделювання руху вологого повітря в циклоні.

Розглянемо конструктивні розміри досліджуваного циклону ЦН-15, в якому процеси відбуваються за нормальних умов (рис.3.1.) [8, 53,55].

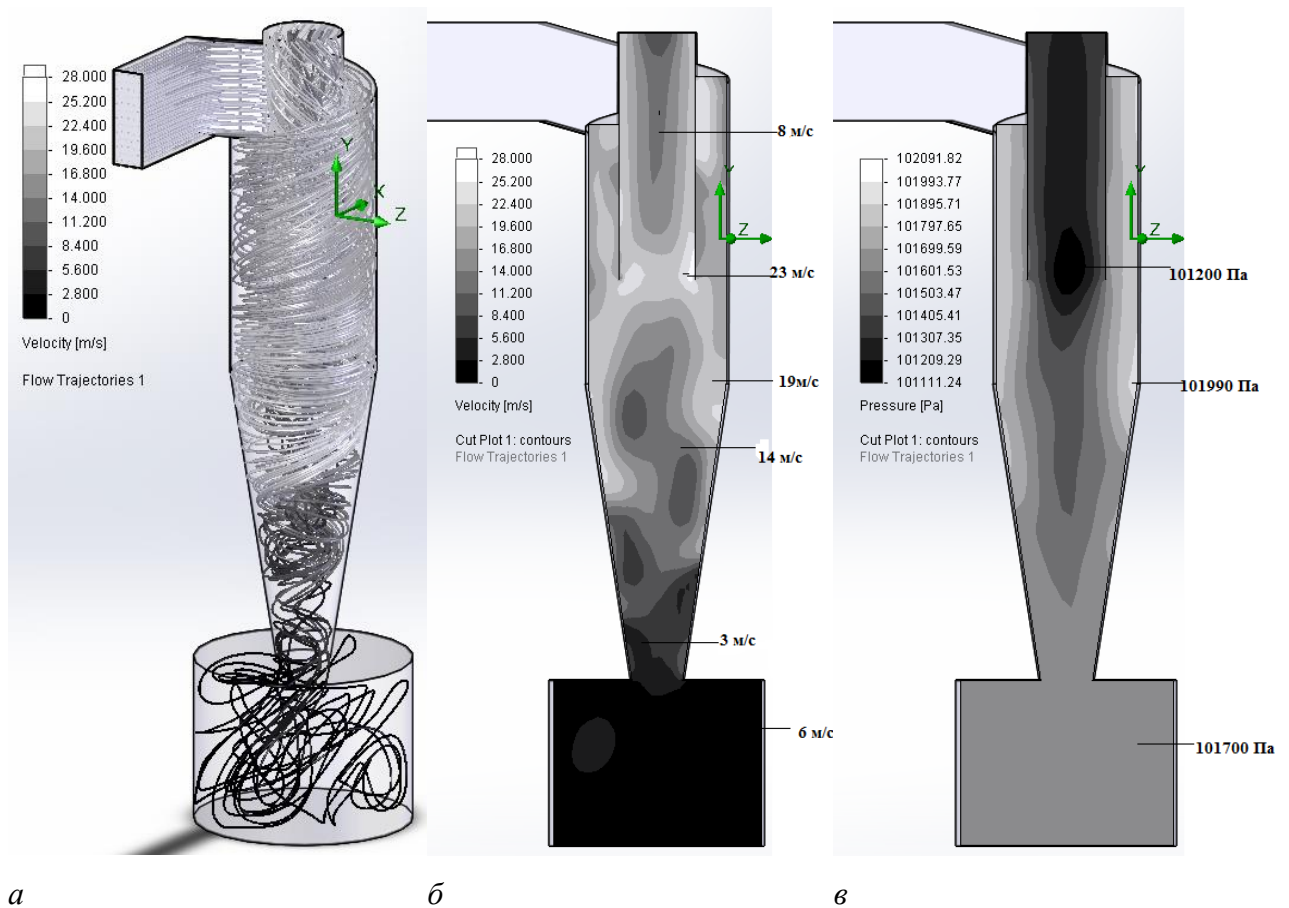


Швидкість повітря у вхідному патрубку приймали рівною $V = 20$ м/с. Густина повітря $\rho_p = 1,3$ кг/м³, температура повітря $T_0 = 20^\circ\text{C}$; статичний тиск на виході з вихлопної труби циклона дорівнює атмосферному [8, 55].

Основні результати, які були отримані засобами FlowVision представлені нижче [8].

На рисунку 3.2, а зображено траєкторії руху повітряного потоку в циклоні. Через вхідний патрубок потік повітря надходить у циклон. Швидкість руху тут складає 20 м/с. Потрапивши у циліндричний корпус циклона, потік починає обертатися навколо осі апарата і в той же час здійснювати поступальний рух вниз до конічної частини. Особливим є те, що кут нахилу траєкторії

Рис. 3.1 – Модель циклона (поздовжній переріз) руху в циліндричній частині є змінним. На початку обертання він дорівнює 15° . В просторі між вихлопною трубою та корпусом апарата кут нахилу залишається незмінним, а нижче вихлопної труби починає зменшуватися. У місці з'єднання циліндричної та конічної частини вказаний кут близький до нуля. У цьому місці потік робить оберт навколо осі циклона. Потрапивши у конічну частину апарата потік знову починає рухатися під кутом, який є близьким до 15° на середині висоти конічної частини. Поблизу нижнього краю кут нахилу траєкторії зменшується. Тут відбувається розподіл потоків. Частина повітря здійснює поворот на 180° і, утворюючи внутрішній вихор, підіймається вгору, потрапляє у вихлопну трубу, а звідти, продовжуючи обертатися, у атмосферу. Інша частина повітря потрапляє у бункер [8, 53].



a – траєкторії руху; *б* – розподіл швидкості; *в* – розподіл статичного тиску
 Рис. 3.2 – Траєкторії руху повітря та розподіл значення швидкості та статичного тиску в плоскому перерізі циклона

На рисунках 3.2, б і 3.2, в зображено відповідно розподіл швидкості повітря та статичного тиску у площині, яка проходить через поздовжню вісь циклона, де видні нерівномірності (рис. 3. 2, б). Розподіл швидкості повітря є нерівномірним (рис. 3.2, б). Високі значення швидкостей зафіксовані поблизу нижнього краю вихлопної труби та у конічній частині апарата. Статичний тиск розподілений більш симетрично (рис. 4.2, в). Найвищі значення зафіксовані поблизу зовнішньої стінки циклона (101990 Па), а найнижчі – на вході у вихлопну трубу (101200 Па). За висотою в циліндричній частині пиловловлювача статичний тиск розподілений рівномірно[8, 53,55].

Спираючись на дослідження доц. Р.І. Гаврилів, доц. В.В. Майструк, магістрів О.О. Тимура та О.М. Кухар, а саме їх робота «ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЦИКЛОНІВ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ SOLID WORKS FLOW SIMULATION», було проаналізовано гідравлічний опір циклону ЦН-15[42].

Геометричні дані досліджуваного циклону наведені в табл.3.1.

Табл.3.1.

Конструктивні розміри досліджуваних циклонів

Параметр, мм	Тип циклону
	ЦН-15
Діаметр циклона	400
Діаметр вихлопної труби	240
Діаметр центральної труби	-
Висота циліндричної частини	904
Висота конічної частини	800
Висота вихлопної труби	
Висота робочої зони	-
Висота центральної труби, h	1024
Розмір вхідного патрубку	264×104
Діаметр коаксіальної вставки	-
Діаметр бункера	-
Висота бункера	800
Висота конічної частини бункера	380
Ширина бункера	690
Кількість пилорозвантажувальних отворів	-
Розміри пилорозвантажувальних отворів	-

Для того щоб створити твердотільну модель досліджуваного циклону в системі автоматизованого проектування Solid Works використовували програмний комплекс Flow Simulation (рис.3.3.) [42].

Одержані дані теоретично розрахованого гідравлічного опору засобами Solid Works Flow Simulation та визначеного на експериментальному стенді представлені у вигляді графічних залежностей $\Delta P=f(W_0)$ на рис. 3.4. Результати наведені на рис. 3.4. свідчать

про те, що із збільшенням фіктивної швидкості газового потоку збільшується гідравлічний опір циклона. Характер цієї залежності описується загальновідомим рівнянням [42]:

$$\Delta P = \zeta_0 (\rho W_0^2 / 2),$$



Рис.3.3. Твердотільна модель досліджуваного циклону

де: W_0 – фіктивна швидкість газового потоку в робочій зоні апарата, ρ – густина газу, ζ_0 – коефіцієнт гідравлічного опору.

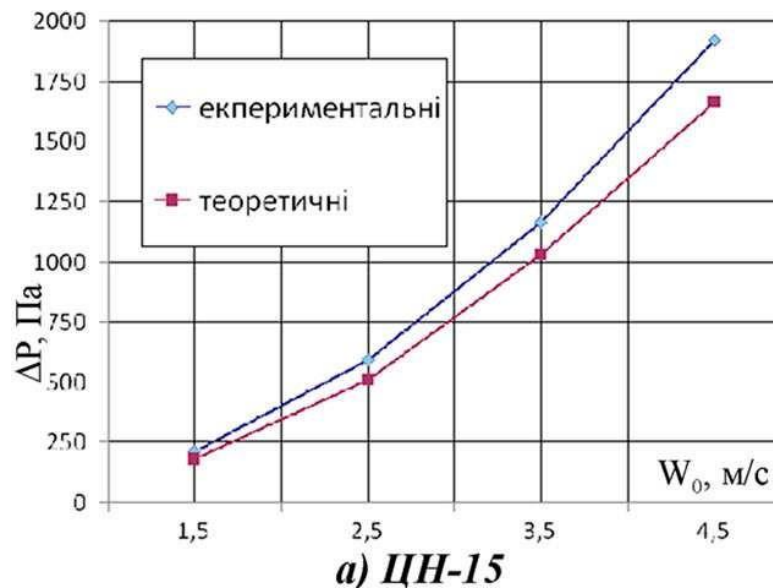


Рис. 3.4. Результати досліджень гідравлічного опору циклонів

3.2. Результати досліджень руху повітря при підвищеній вологості повітря

Для виявлення впливу вологого повітря на роботу циклону були проведені дослідження у програмі SolidWorks з побудованою моделлю ЦН-15.

Для моделювання рух повітряних потоків було задано початкові й граничні умови, які, своєю чергою, визначаються формою і конструктивними особливостями апарата та умовами його роботи:

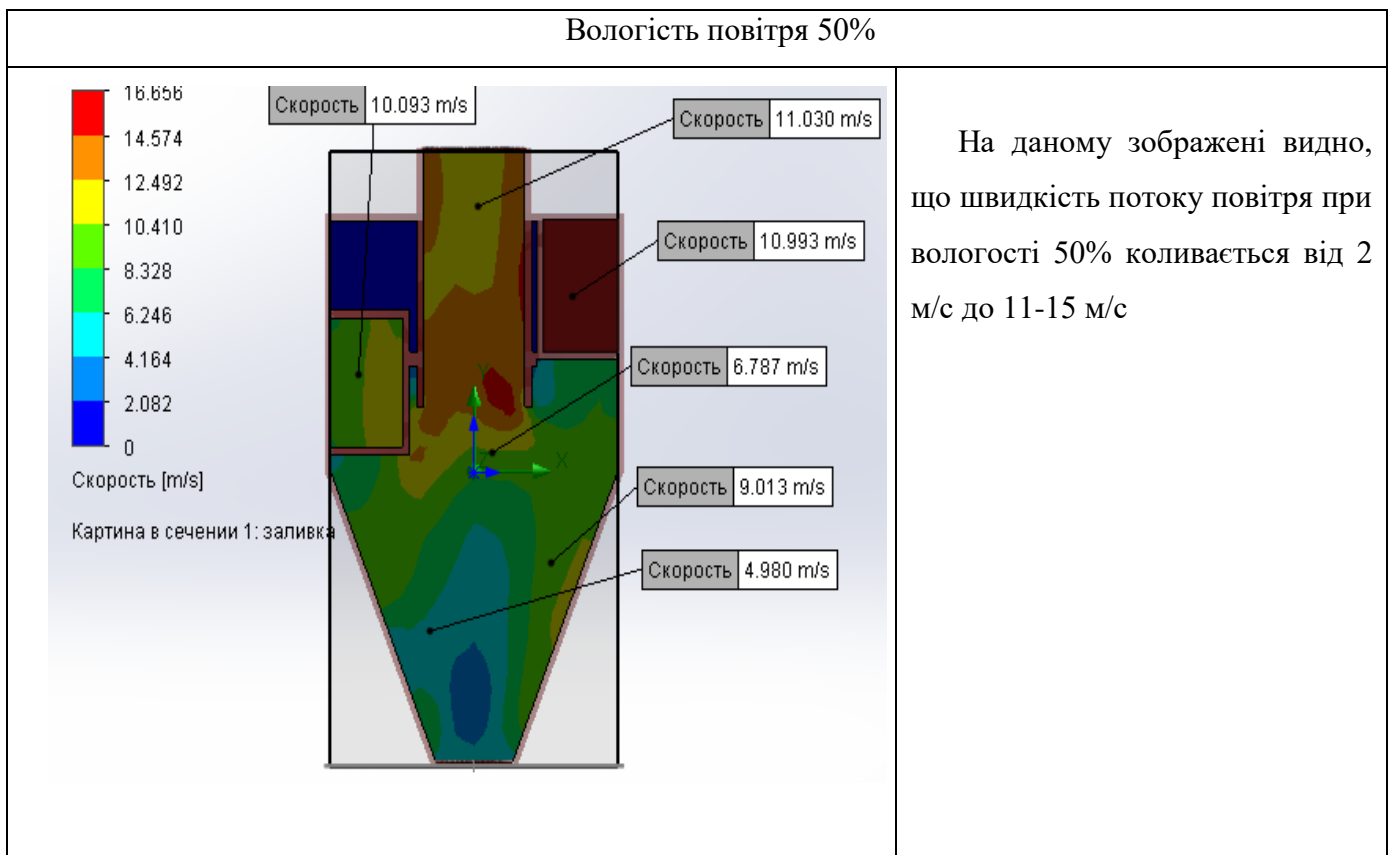
- атмосферний тиск за нормальних умов $p_0 = 101325 \text{ Па}$;
- температура повітря $T_0 = 30^\circ\text{C}$;
- рівність нулю швидкості на нерухомій твердій границі;
- об'ємні витрати на виході циклону $0,016 \text{ м}^3/\text{с}$.
- відносна вологість 50, 70 та 90%

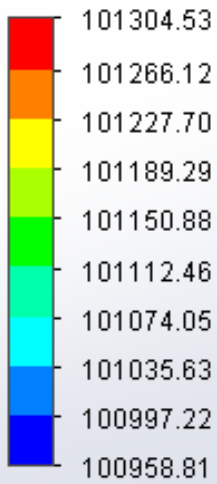
Гідравлічний опір визначали як різницю тиску на вході і на виході з апарата. Припустимо, що обладнання працює під розрідженням, тому повний тиск на вході в апарат дорівнює атмосферному. Отримані дані моделювання занесено до табл. 3.2.

Табл. 3.2.

Результати моделювання

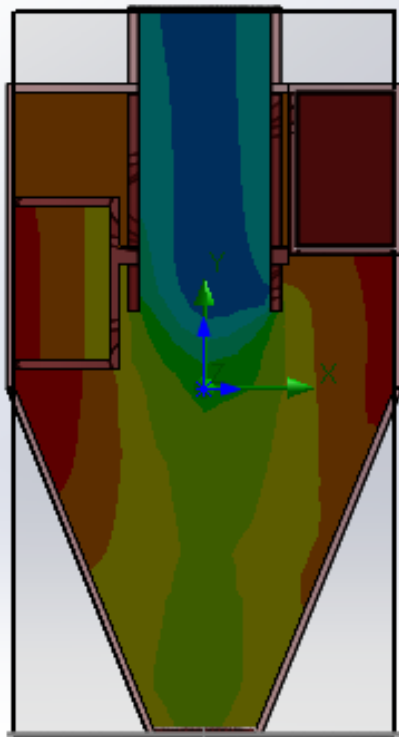
Вологість повітря 50%



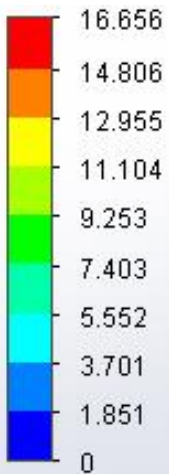


Давление [Pa]

Картина в сечении 1: заливка

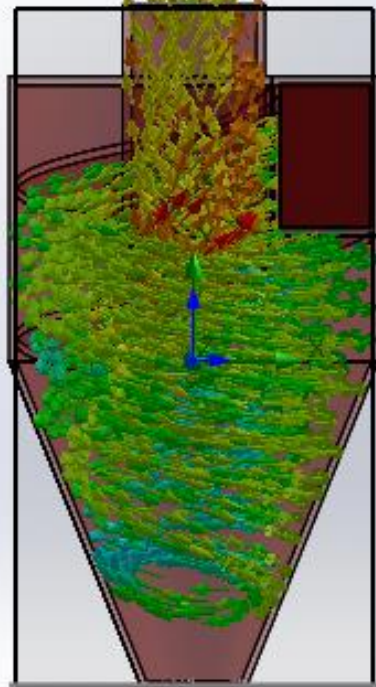


На даному зображенні видно, що через вихідний патрубок проходить повітря з мінімальним тиском.

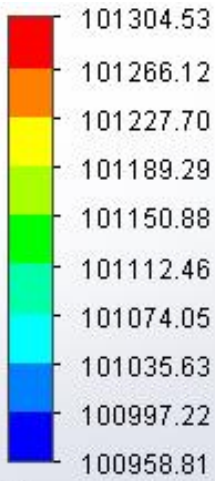


Скорость [m/s]

Траектории потока 1

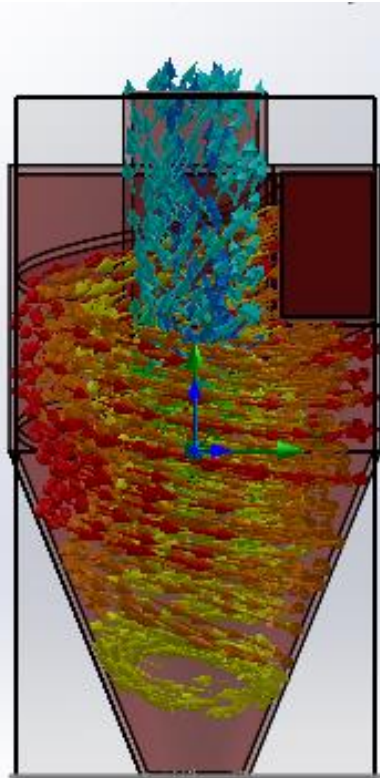


Побудовані траєкторії руху повітряних потоків з розподілом складових швидкості в горизонтальних перерізах. Бачимо незначне збільшення тангенціальної швидкості по радіусу.



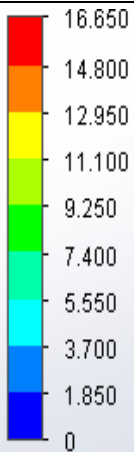
Давление [Pa]

Картина в сечении 1: заливка
Траектории потока 1



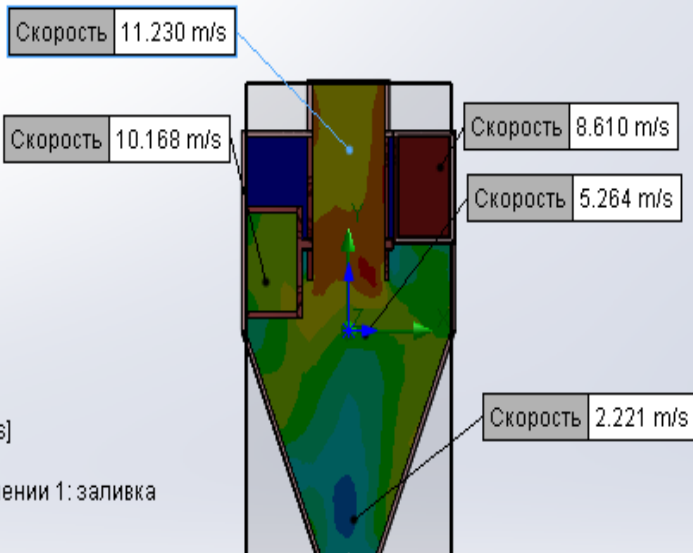
Як бачимо статичний тиск у циклоні знижується по радіусу до центра, циклону досягаючи мінімуму на осі.

Вологість повітря 70%

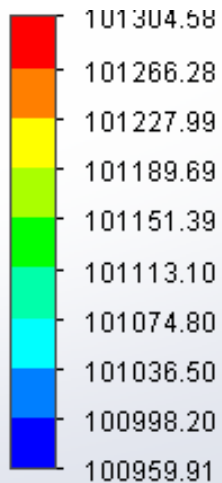


Скорость [m/s]

Картина в сечении 1: заливка

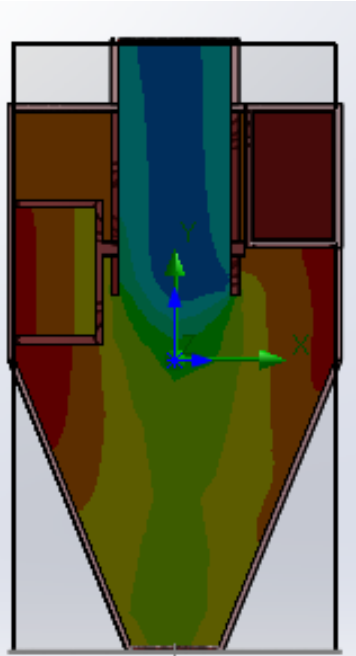


На даному зображенні видно, що швидкість потоку повітря при вологості 70% коливається від 2 м/с до 11 м/с

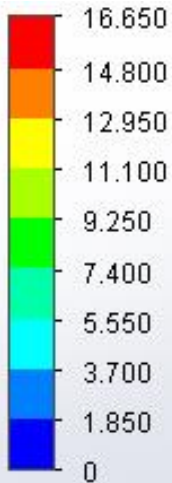


Давление [Pa]

Картина в сечении 1: заливка



На даному зображенні видно, що через вихідний патрубок проходить повітря з мінімальним тиском.

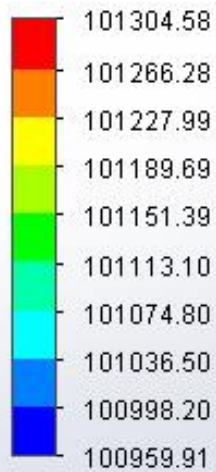


Скорость [m/s]

Траектории потока 1

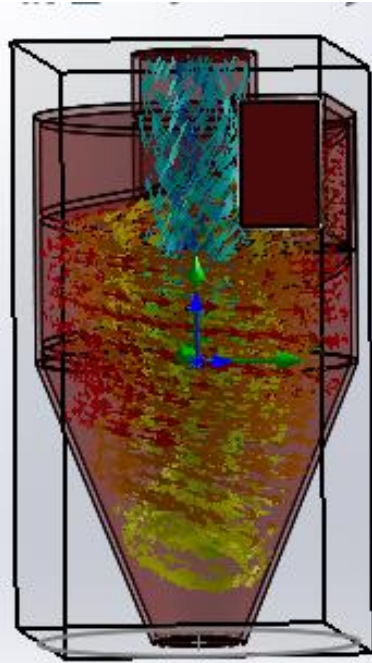


Побудовані траєкторії руху повітряних потоків з розподілом складових швидкості в горизонтальних перерізах. Бачимо збільшення тангенціальної швидкості по радіусу.



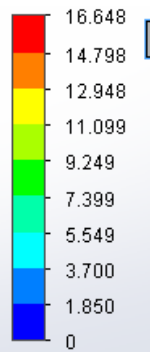
Давление [Pa]

Траектории потока 1



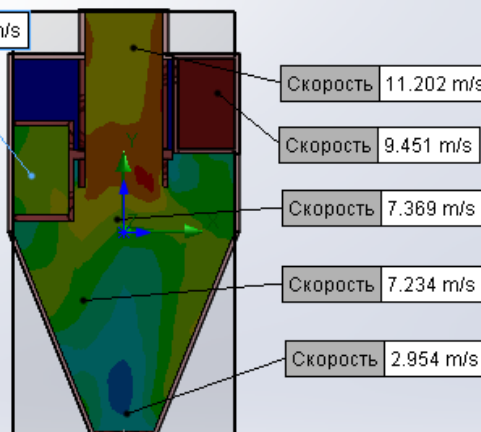
Як бачимо статичний тиск у циклоні знижується по радіусу до центра, циклону досягаючи мінімуму на осі.

Вологість повітря 90%

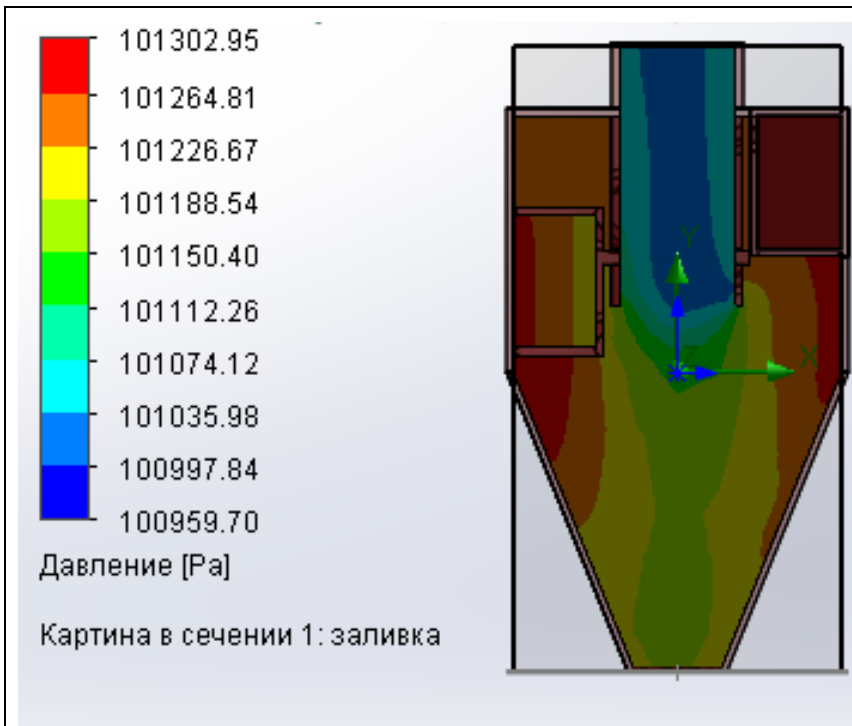


Скорость [m/s]

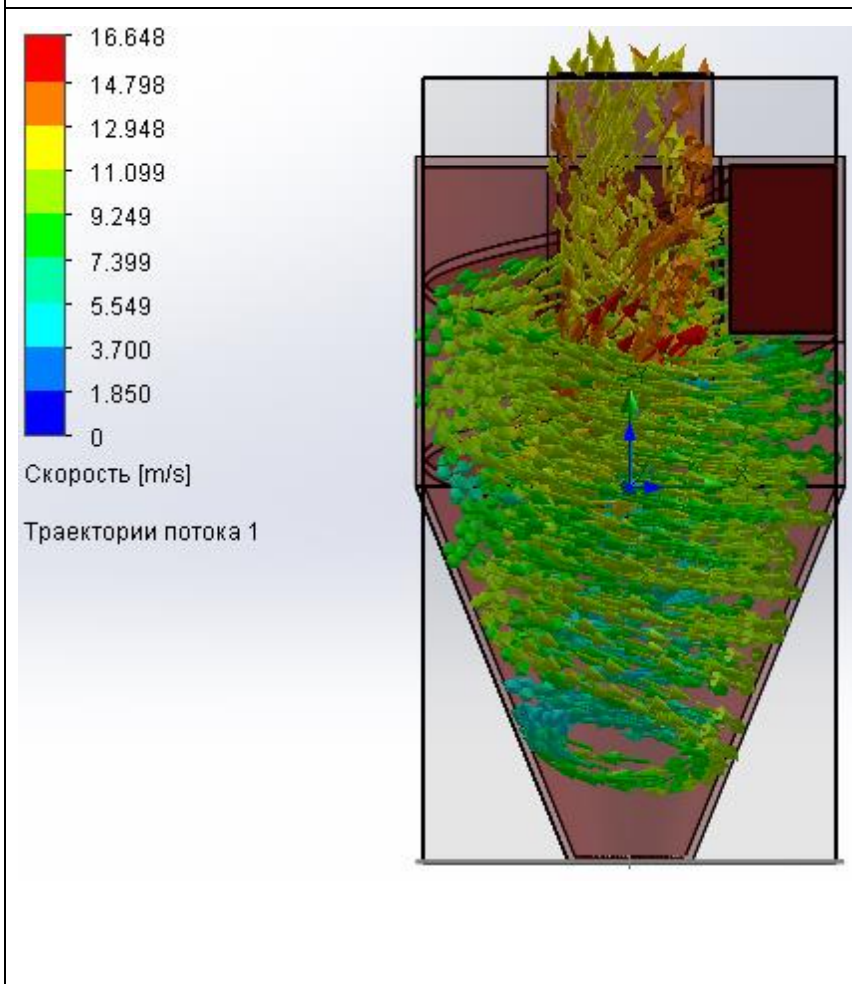
Картина в сеченні 1: заливка



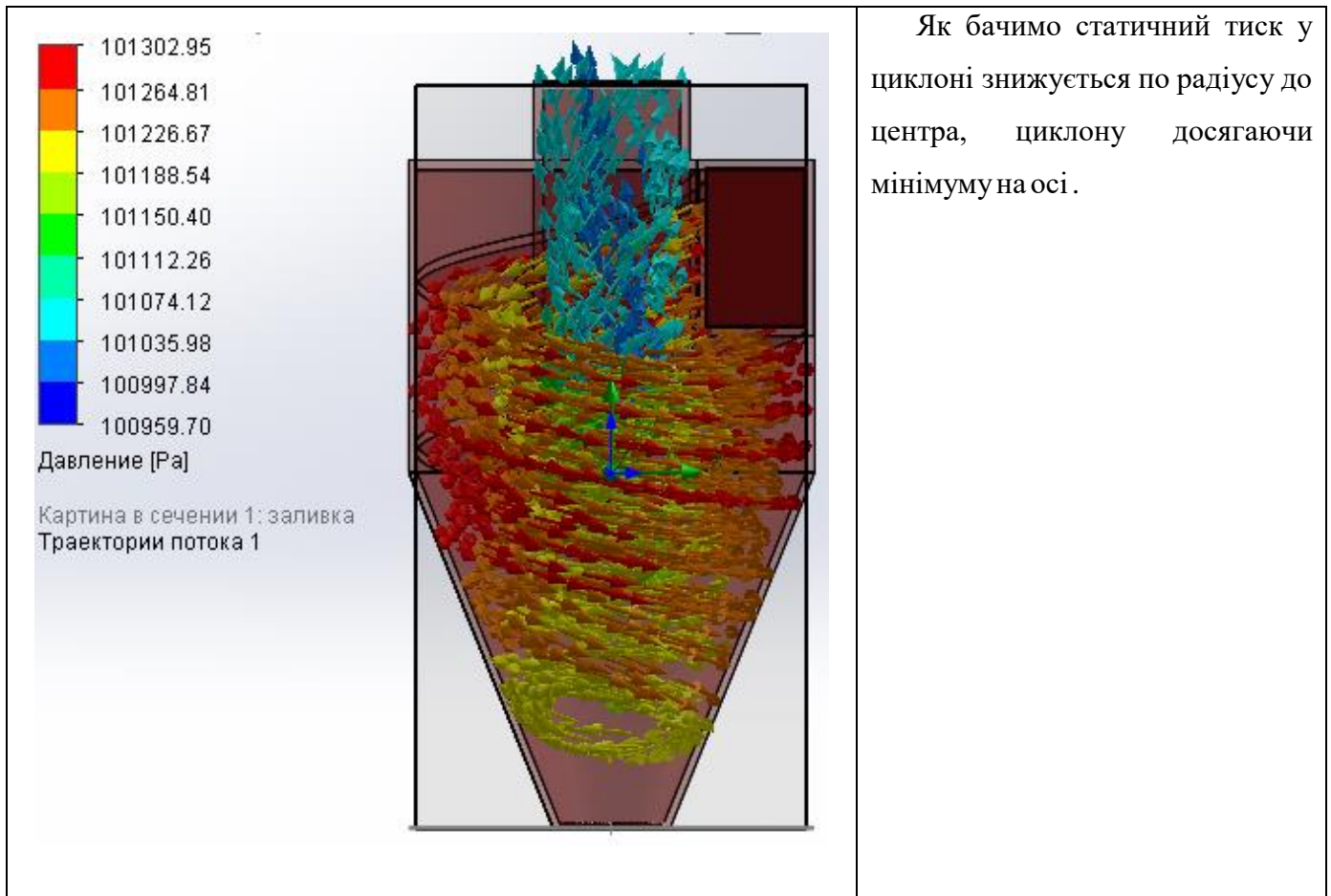
На даному зображенні видно, що швидкість потоку повітря при вологості 90% коливається від 2 м/с до 11 м/с



На даному зображенні видно, що через вихідний патрубок проходить повітря з мінімальним тиском.



Побудовані траєкторії руху повітряних потоків з розподілом складових швидкості в горизонтальних перерізах. Бачимо не збільшення тангенціальної швидкості по радіусу.



Аналіз проведеного моделювання свідчить про те, що у периферійній частині криволінійного потоку можна побачити збільшення тангенціальної швидкості по радіусу. Рух потоку суміші вздовж осі циклона через тертя газової складової об тверду стінку тангенціальна складова зменшується, тому зменшується відцентрова сила, але в цей же час зростає осьова складова швидкості [8].

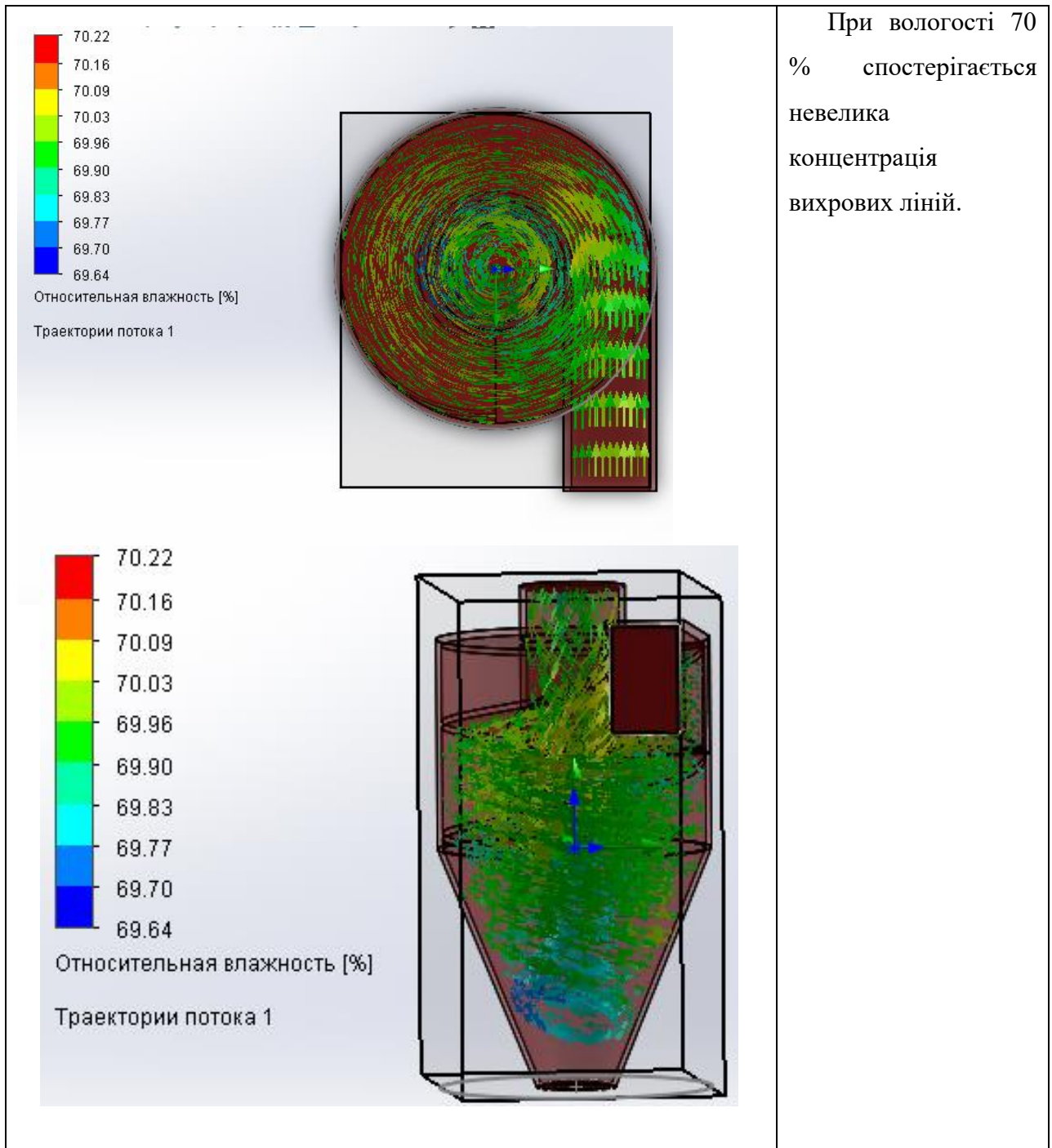
У нижніх шарах робочої частини рівновага між силами статичного тиску і відцентровою силою порушується, виникають радіальні течії, які напрямлені до осі, а саме, підсилюються вторинні потоки і зростає гідравлічний опір. Це є особливою характеристикою циклона ЦН-15, у якого гідравлічний опір найвищий.

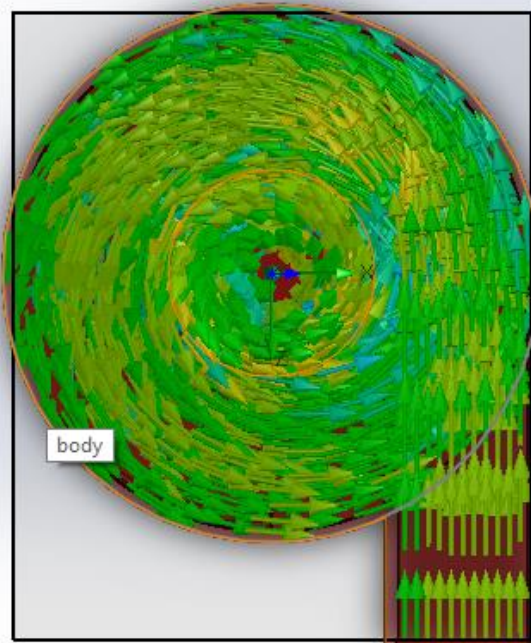
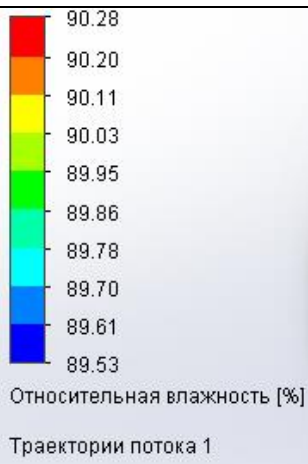
Проаналізувавши вплив вологи на роботу циклону можна зробити такі висновки:

1. Швидкість руху у циклоні не залежить від вологості повітря, але вологість впливає на її траєкторію.
2. Вологість повітря не впливає на зміну тиску.

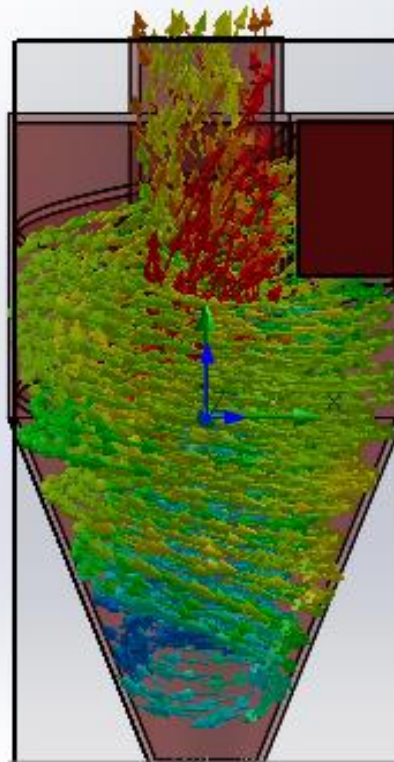
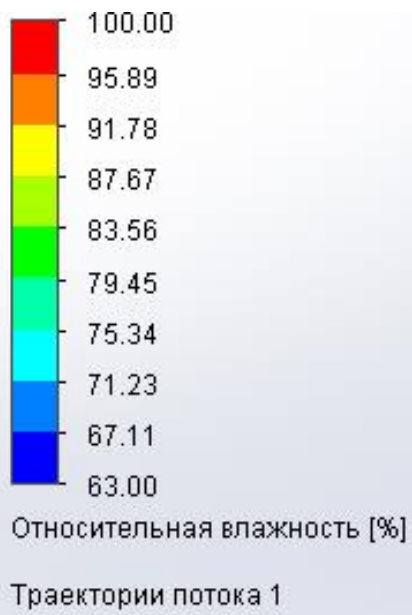
Далі проаналізуємо концентрацію вологи та її розподілення в перерізі циклону (табл.3.3).

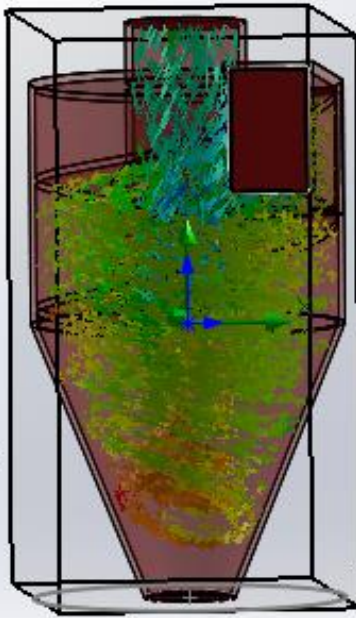
Концентрація вологи в циклоні



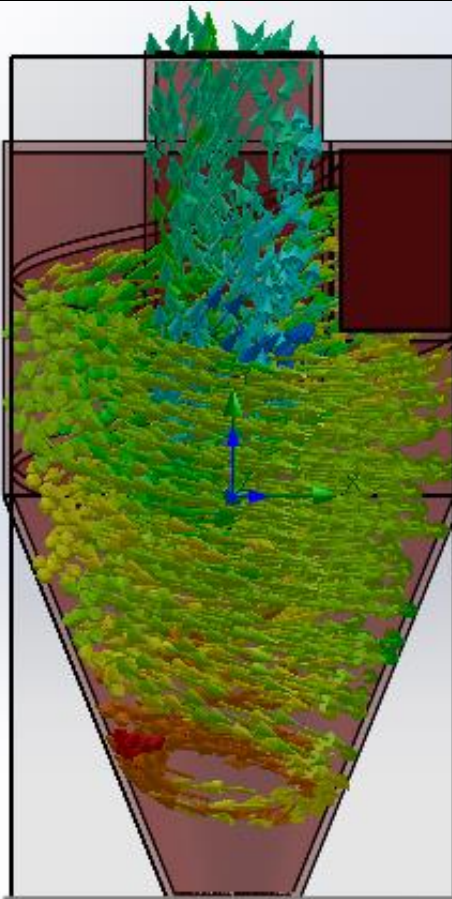
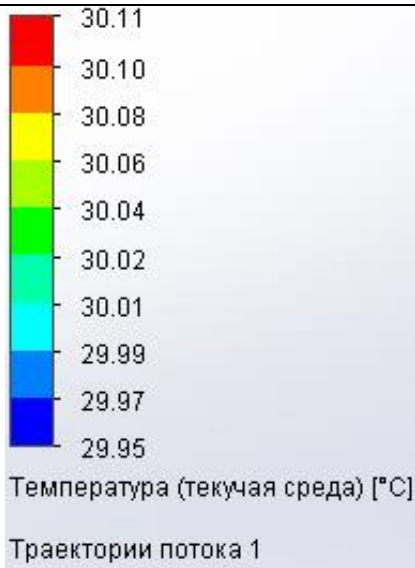


При вологості 90 % спостерігається велика концентрація вихрових ліній.





На даному зображенні видно, що повітряна суміш охолоджується по траєкторії руху та вже на виході має значно нижчу температуру.



На даному зображенні видно, що повітряна суміш охолоджується по траєкторії руху та вже на виході має значно нижчу температуру.

За результатами моделювання можна побачити, що зі збільшенням відносної вологості повітря збільшується її концентрація в самому циклоні. При чому концентрація зменшується разом зі зменшенням відцентрової сили. Але навіть враховуючи зменшення відцентрової сили, викид вологого повітря через вихідний патрубок не може зменшитися на стільки, щоб задовільнити поставлену задачу магістерської дисертації. Тому було проведено експериментальні досліди коагуляції вологого повітря за допомогою ультразвукового кавітатору. Результати експерименту вказані на рис.3.5 та 3.6



Рис.3.5. Коагуляція вологого повітря

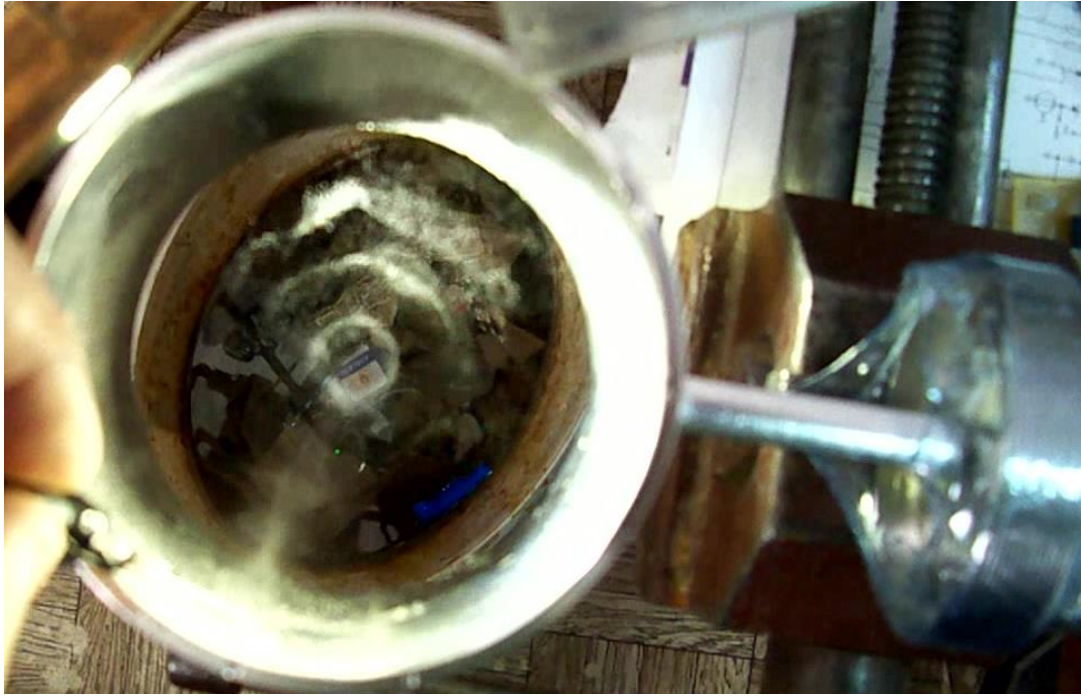


Рис.3.6. Коагуляція вологого повітря

Насичене вологим пилом повітря проходить крізь ультразвукове поле, утворене трубчастим вібратором, розкладається на складові внаслідок руху частинок забруднювача та краплинок вологи залежно від розмірів та ваги в зони вузлів та пучностей стоячої ультразвукової хвилі деформації [47]. У цих зонах відбувається коагуляція краплинок та укрупнення за рахунок злипання частинок забруднювача. Набравши необхідну масу, укрупнені частинки відносяться потоком повітря і за рахунок відцентрових сил осідають на стінках осушувача. Краплинки вологи, що потрапили на внутрішню поверхню вібратора коагують та змочують цю поверхню тонким шаром. Внаслідок ефекту ультразвукового розпилення у тонкому шарі ця рідина розпилюється у дрібнодисперсний аерозоль [45, 46-48], який швидко випаровується внаслідок радикального збільшення площі поверхні контакту з потоком повітря [52].

3.3. Висновки

Аналіз та узагальнення результатів теоретичних та експериментальних дослідів дають можливість зробити такі висновки:

- застосування ультразвукового методу осушення запиленого вологого повітря дозволяє уникнути застосування потужних енергосистем;
- аналіз траєкторії руху закрученого газового потоку в апараті дає змогу розробити практичні рекомендації під час створення нових та модернізації наявних пилоочисних апаратів;
- значно скорочується час та затрати на розробку, проектування та експериментальні дослідження циклонів.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ

Даний розділ ставить за мету проведення всебічного маркетингового аналізу запропонованого стартап-проекту для визначення основних перспектив впровадження його на ринок та потенційних напрямків його застосування [53].

4.1. Опис ідеї проекту

У табл.4.1 наведено дані щодо змісту ідеї, можливих напрямків застосування та основні вигоди, які зможуть отримати потенційні користувачі [53].

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартап - проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Промислове осушення та очищення повітря в апаратах циклонного типу за допомогою ультразвукових кавітаторів.	1. Системи очищення повітря	Збільшення ефективності працездатності системи. Очищення повітря від великих часток пилу.
	2. Системи осушення повітря	Підвищення ефективності роботи системи, за рахунок мінімізації ризику потрапляння вологи у виробничий процес.

У таблиці 4.2 подано аналітичну інформацію щодо техніко-економічних переваг запропонованої ідеї у порівнянні з аналогічними пропозиціями конкурентів.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що запропонований до впровадження вид обладнання має значні конкурентні переваги та може бути використаний на різних типах виробництв.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Так як у якості стартап-проекту ми пропонуємо виготовлення обладнання для промислового осушення та очищення повітря в апаратах циклонного типу за допомогою ультразвукових кавітаторів, то результати аудиту матимуть такий вигляд [53]:

- обладнання системи (всі виконавчі органи) виготовлено з металу. При ймовірній заміні матеріалу мінімізуються вигоди від використання запропонованого обладнання, та у порівнянні з початковою ідеєю будуть змінюватись робочі характеристики обладнання.

Таблиця 4.2.

Визначення характеристик ідеї проекту

	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проєкт	Дональдсон	Зернова столиця	Лубни маш			
1	Ефективність очищення та осушення, %	86%	89%	75%	75%		+	
2	Вартість, тис.грн	35	84	30	45			+

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Для того, щоб детально спланувати шляхи та способи подальшого розвитку та доцільність впровадження проекту, необхідно проаналізувати стан ринкового середовища, вивчити можливі загрози при виведенні товару на ринок, з'ясувати потреби потенційних клієнтів та порівняти з пропозиціями проєктів-конкурентів [53].

4.3.1. Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.3).

Таблиця 4.3.

Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проєкту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	20
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	30 млн. дол.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ГОСТ 15150-69 Машини, прилади та інші

		технічні вироби. Виконання для різних кліматичних районів. Категорії, умови експлуатації, зберігання і транспортування в частині впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15%

Вивчивши дані, отримані у результаті проведеного аналізу та наведені у таблиці 4.3, можна зробити висновок, що за попередніми оцінками ринок є привабливим для впровадження проекту.

4.3.2. Наступним етапом є визначення потенційних цільових сегментів ринку, вивчення основних характеристик цільової аудиторії та формування приблизного переліку вимог до товару для кожного сегменту (табл. 4.4) [53].

Таблиця 4.4.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Досягнення високого рівня ефективності осушення та очищення повітря на промислових підприємствах	1) Зернова промисловість; 2) Деревообробна промисловість; 3) Будівельна промисловість 4) Харчова промисловість	1) ГОСТ 15150-69 2) Різний тип обладнання; 3) Різні потужності виробництва 4) Різні галузі застосування 5) Різні умови експлуатації	1) Легке встановлення системи; 2) Ремонто-придатність; 3) Окупність в найкоротші строки; 4) Надійність 5) Довговічність 6) Висока ефективність

4.3.3. Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню

проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 4.5 - 4.6). Фактори в таблицях подані в порядку зменшення значущості [53].

Таблиця 4.5.

Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Вартість	Вартість виготовлення вища у порівнянні з пропозиціями конкурентів	Встановлення обладнання іншого постачальника.
2	Термін служби	Строк служби має бути більшим, ніж період окупності системи	Заміна на нову систему іншого постачальника. Відмова від подальшої співпраці.

Таблиця 4.6.

Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Підвищення ефективності очищення та осушення повітря	Скорочення експлуатаційних витрат та зменшення періоду простою	Перехід на систему даного типу для всіх етапів виробництва, де необхідне ефективне очищення та осушення повітря
2	Зменшення витрат на систему	Зменшення собівартості продукту, що випускається	Зниження вартості вихідного продукту

4.3.4. Далі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.7).

Таблиця 4.7.

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія/ монополістична/чиста	монополістична	Диференціація пропонованої продукції. Оперативне реагування на зміну попиту та зростання вартості.
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/...	Національна	Залучення державних та приватних інвесторів, сприяння вливанню капіталів та створення здорового конкурентного середовища.
3. За галузевою ознакою - міжгалузєва/ внутрішньогалузєва	внутрішньогалузєва	Розширення ринків збуту. Удосконалення структури виробництва відповідно до нових потреб.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	товарно-родова	Удосконалення продукції, виокремлення УТП, розширення сфер застосування обладнання, збільшення асортименту.
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	нецінова	Підвищення ефективності осушення та очищення повітря
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	марочна	Просування продукції усіма можливими маркетинговими каналами.

4.3.5. Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 4.8).

Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	«Зернова столиця», «ЛубниМаш», «Дональдсон», «Реннер компресорен», «Озен Компресор»	Цінові бар'єри, збільшення витрат на просування	Ціни, рівень обслуговування, надання додаткових опцій	Попит, чітке формулювання технічних параметрів.	Сфера застосування продукту, рівень ефективності, економічні показники
Складові аналізу	На ринку спостерігається тенденція до збільшення кількості як вітчизняних так і закордонних підприємств-виробників подібного обладнання, що сприяє посиленню конкуренції.	Бар'єри входу на ринок є порівняно незначними. Для впровадження нового товару не знадобиться багато часу, оскільки пропонується товар, який вже існує, але з покращеними характеристиками та новими можливостями.	Постачальники суттєво не впливають на умови роботи на ринку збуту обладнання, хоча треба враховувати чітку залежність від постачальників в якості продукції, так і можливих обсягів її виробництва.	Споживачі диктують наступні умови роботи на ринку: конкурентна ціна, висока якість, продуктивність роботи обладнання та терміни виготовлення/постачання устаткування.	Посилилася конкуренція зі сторони товарів-субститутів – інших видів обладнання для очищення та осушення повітря

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що на ринку спостерігається інтенсивна конкурентна боротьба, проте для впровадження нового товару не знадобиться багато часу, оскільки пропонується товар, який вже існує, але з покращеними характеристиками та новими можливостями, та слід враховувати, що існує загроза з боку товарів-субститутів.

4.3.6. На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 4.3.5 (табл. 4.8), урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.4) та факторів маркетингового середовища (табл. 4.5-4.6) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 4.9 [53].

Таблиця 4.9.

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Унікальність обладнання	Використання ультразвукового кавітатора для осушення повітря.
2.	Ціна	Оскільки такий спосіб очищення та осушення повітря є значно дешевшим, ніж фільтрувальні установки з додатковими осушувачами, то ціна на товар є одним з засобів ведення конкурентної боротьби.
3.	Функціональність	Можливість використання у різних галузях промисловості. Та одночасне очищення та осушення повітря.

4.3.7. Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (табл. 4.10).

Таблиця 4.10.

SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Унікальність обладнання; 2. Покращення техніко-економічних показників установок 3. Нижча ціна порівняно з конкурентами 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Обладнання підходить для уловлювання лише великих часток пилу; 2. Відсутність чітко вираженої маркетингової стратегії, непослідовність в її реалізації.
--	--

<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість збільшення обсягів реалізації за рахунок ефективного очищення повітря та, відповідно, зменшення викидів в атмосферу. 2. Можливість збільшення обсягів продаж за рахунок впровадження додаткових опцій 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Загроза втрати споживачів внаслідок збільшення ефективності та функціональності товарів-субститутів. 2. Загроза підвищення цін на продукт унаслідок підвищення цін комплектуючі обладнання.
---	---

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

4.4.1. Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.11) [53].

Таблиця 4.11.

Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Зернова промисловість	+	високий	середня	середня
2	Деревообробна промисловість	+	високий	середня	середня
3	Будівельна промисловість	+	високий	середня	середня
4	Харчова промисловість	+	високий	середня	середня
Які цільові групи обрано: обрані всі чотири цільові групи потенційних споживачів					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) визначена стратегія охоплення ринку: компанія працює зі всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму (включно із характеристиками товару/послуги), значить використовується масовий маркетинг.

4.4.2. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 4.12) [53].

Таблиця 4.12.

Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Розвиток ринку	Масовий маркетинг	Низькі витрати створюють бар'єр входу для нових конкурентів і одночасно хороший захист проти товарів-замінників	Стратегія лідерства по витратах
2	Розвиток товару	Диференційований маркетинг	Відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників	Стратегія диференціації
3	Більш глибоке проникнення на ринок	Концентрований маркетинг	Задоволення потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти	Стратегія спеціалізації

На основі таблиці 4.12 обрана базова стратегія розвитку - стратегія диференціації.

4.4.3. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.13) [53].

Таблиця 4.13.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Так	Ні	Стратегія лідера

2	Ні	Так	Ні	Стратегія виклику лідера
3	Ні	Ні	Так	Стратегія наслідування лідеру
4	Так	Ні	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

На основі таблиці 4.13 стратегія конкурентної поведінки - стратегія лідера.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.5.1. Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.14 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару [53].

Таблиця 4.14.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Зменшення кількості викидів в атмосферу та забезпечення достатнього рівня осушення повітря	Підвищення ефективності очищення та осушення повітря	Легкість в обслуговуванні та діагностиці
2	Зменшення витрат на систему	Зниження собівартості готової продукції	Невелика вартість системи

4.5.3. Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги

або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.15) [41]. Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.15.

Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
3-4 тис. дол.	6-18 тис. дол.	5 млрд. дол.	12-15 тис. дол. на ступінь

4.5.4. Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.16) [53]:

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 4.16.

Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Характерно для різноманітних галузей промисловості, де виникає проблема зі значною концентрацією вологого пилу	Просування на ринок подібних продуктів в рамках даної системи збуту не вимагає будь-якої широкої реклами. Швидше потрібно одного разу з'ясувати, хто з потенційних покупців інновацій має в них потребу і яка поточна платоспроможність даного клієнта.	Канал нульового рівня	Канал складається з виробника, який продає свій товар безпосередньо споживачам (через відділ збуту та збутові філії)

4.5.5. Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 4.17).

Таблиця 4.17.

Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Різноманітні галузі промисловості, де виникає проблема зі значною концентрацією вологого пилу	Пряма поштова розсилка, каталоги, сайт, спеціалізовані видання та виставки	Конкурентне позиціонування, яке базується на демонстрації переваг товарів підприємства над товарами конкурентів.	Отримати можливість у кілька разів збільшити обсяг продажу своїх товарів	Підкреслення унікальності, ергономічності та інших переваг обладнання над конкурентами

4.6.Висновки

Проведений аналіз можливості ринкової комерціалізації проекту дозволяє зробити висновок, що запропонований до впровадження вид обладнання має значні конкурентні переваги та може бути використаний на різних типах виробництв, визначені його сильні та слабкі сторони. Для впровадження нового товару не знадобиться багато часу, оскільки

пропонується товар, який вже існує, але з покращеними характеристиками та новими можливостями, та слід враховувати, що існує загроза з боку товарів-субститутів.

Даний ринок є привабливим для входження через невелику вартість та високу ефективність технології. Проаналізувавши потенційні групи клієнтів, можна зробити висновок, що бар'єри входу на ринок не дуже великі, через унікальність технології, у порівнянні з товарами конкурентів. Даний проект можна вважати перспективним для впровадження.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Згідно Кодексу законів про працю України на всіх підприємствах повинні створюватися здорові і безпечні умови праці (ст. 153). Ці умови включають раціональне використання площі виробничих приміщень та місць розташування обладнання, вірну

експлуатацію обладнання і організацію технологічних процесів, захист працюючих від впливу шкідливих умов праці, додержання в виробничих приміщеннях, місцях розташування обладнання та на робочих місцях санітарно-гігієнічних норм та правил [54].

Тема дипломного проекту є «Промислове осушення повітря за допомогою ультразвукових кавітаторів». Контроль параметрів технологічного процесу здійснює інженер виробництва у апаратній кімнаті, площа якого $S=14\text{м}^2$ та об'єм приміщення $V=42\text{м}^3$.

Шкідливими і небезпечними виробничими факторами при роботі та обслуговуванні установки:

- повітря робочої зони;
- виробниче освітлення;
- виробничий шум і вібрація
 - ураження електричним струмом;
 - пожежонебезпечність.

У виробничому приміщенні працює 2 робітника – інженери.

5.1. Повітря робочої зони

Значення величин температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні виробничого приміщення наведені в таблиця 5.1. [54].

Проектом передбачена припливно-витяжна вентиляція приміщення де розташована операторська. У приміщенні передбачена безперервно діюча [54].

ГДК=6мг/м³, при цьому фактичний ГДК=4,5 мг/м³ що відповідає ГОСТ 12.1.005-88.

Таблиця 5.1

Значення величин температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні виробничого приміщення

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Фактична	Оптимальна	Фактична	Оптимальна	Фактична
Холодний період року	1 б	21-23	19-21	40-60	50-60	0,1	0,1

Теплий період року	1 б	22-24	22-25	40-60	50-60	0,1	0,2
--------------------	-----	-------	-------	-------	-------	-----	-----

Параметри метеорології забезпечуються в літку у зоні роботи операторів передбачається кондиціонування повітря за допомогою сплит - систем. В взимку приміщеннях запроектоване парове опалення.

5.2. Виробниче освітлення

Згідно розряд зорових робіт на проектованому виробництві IVв [54].

Світильники обрані виходячи з категорії і класу приміщень по вибухо-пожежобезпечності й умов експлуатації відповідно до ПУЕ і ДСТ P51330.13-99.

Для освітлення виробничих приміщень проектом передбачені люмінесцентні світильники Л201Г 2x40-08 з лампою PHILIPS потужністю 40 Вт і світловим потоком $F=3000\text{лм}$ [54].

Значення фактичної освітленості обраховується за формулою:

$$E_{\phi} = \frac{\Phi \cdot N \cdot n \cdot \eta}{S \cdot z \cdot K_3} = \frac{3000 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 0,46}{14 \cdot 1,1 \cdot 1,7} = 358\text{лк},$$

де F – світловий потік однієї лампи, $F = 3000\text{лк}$;

N – кількість світильників, $N = 3$ шт;

n – кількість ламп у світильнику, $n = 2$ шт.;

η – коефіцієнт використання світлового потоку, $\eta = 0,46$;

S – площа приміщення, $S = 14\text{м}^2$;

z – коефіцієнт нерівномірності розподілу світлового потоку;

K_3 – коефіцієнт запасу на запиленість і зменшення світлового потоку від строку служби лампи, $K_3 = 1,7$.

Отже $E_{\phi}=358\text{лк} > E_n = 300\text{лк}$, то освітлення приміщення відповідає нормам ДБН В2.5.2.8-2006.

Для контролю освітленості використовують люксметри Ю-11 6 разів у рік і після ремонту освітлювальної установки [54].

Напруга мережі загального робочого й аварійного освітлення становить 380/220В. Напруга на лампах 220В. Напруга ремонтного освітлення - 12В.

Керування робочим і аварійним освітленням виконується автоматичними вимикачами з щитків освітлення та вимикачами, встановленими в приміщеннях, а централізовано - з операторських [54].

Згідно СН 181-70 для підвищення рівномірності розподілу яскравості у полі зору, стеля і стіни виробничих приміщень пофарбувати у світлі тони. Виробниче устаткування пофарбувати в ясно-зелені тони, частини що рухаються – ясно-жовті, а відкриті механізми в яскраво-червоний колір.

5.3. Електробезпека

Згідно ПУЕ (“Правила устройства электроустановок”) відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою ураження людей електричним струмом. Електричне устаткування на проєктованій установці живиться від 3-х фазної 4-х провідної електричної мережі перемінного струму промислової частоти з глухозаземлену нейтралу напругою 380/220 В і частотою 50Гц [54].

На пульті управління машиніста напруга $U = 220\text{В}$, частота $f = 50$ Гц. Тип електромережі змінний із глухозаземлену нейтралу. Основними причинами враження електричним струмом є: дотик до відкритих струмопровідних елементів устаткування, що виявилось під напругою внаслідок порушення ізоляції, а також поразка кроковою напругою і через електричну дугу [54].

В процесі експлуатації ізоляція піддається різним ушкодженням (механічним, хімічним, тепловим), а також старінню, в результаті чого погіршуються її властивості – зменшується активний опір. Тому необхідний контроль ізоляції, який проводиться вимірюванням активного опору ізоляції мегаметром класу 1000 В. Вимірювання опору ізоляції окремих ділянок мережі, трансформаторів, електродвигунів тощо проводиться на вимкненій установці [54].

Опір кожної ділянки в мережах напругою до 1000 В повинен бути не менше 0,5 МОм на фазу. Використовувати подвійна ізоляція, яка складається із робочої і додаткової ізоляції. При пошкодженні робочої ізоляції працює додаткова. Це досягається виготовленням корпусів електрообладнання із ізоляційного матеріалу. З подвійною ізоляцією виготовляється апаратура електроустановок (вимикачі, штепселі, розетки тощо).

Блокування попереджує помилкові дії електроперсоналу і перекриває доступ до струмопровідних частин, що знаходяться під напругою. При небезпеці ураження струмом електроустановка автоматично вимикається.

За принципом дії блокування поділяється на електричне, механічне та комбіноване.

Електроблокування здійснює розрив електричного кола спеціальними контактами, які встановлюються на дверцятах огорожень, кришках, дверцятах кожухів. Блок-контакти при відкриванні дверей огорожень, шаф, кожухів знеструмлюють електропристрій.

При механічному блокуванні включення напруги можливо тільки при закритому замку або заскочки, які механічно пов'язані з вимикачем.

Недоступність струмоведучих частин для випадкового дотику забезпечується розміщенням струмоведучих частин на недосяжній висоті і огороженням. В електроустановках до 1000В розміщення струмоведучих частин на недоступній висоті: всередині приміщення – 3,5м; назовні – 6м. Якщо не можливо застосувати огорожувальних пристроїв;

В електроустановках застосовують як суцільні, так і сітчасті огороження у вигляді кожухів, кришок, чохлів, шаф тощо.

Використання електрозахистних засобів, у т.ч. діелектричних рукавичок, інструментів з ізолюючими ручками, показників напруги.

В аварійному режимі застосовуються занулення з автоматичним відключенням.

Занулення — це навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих струмонепровідних частин, які можуть опинитися під напругою (корпуси електроустановки, кабельні конструкції, сталеві труби тощо);

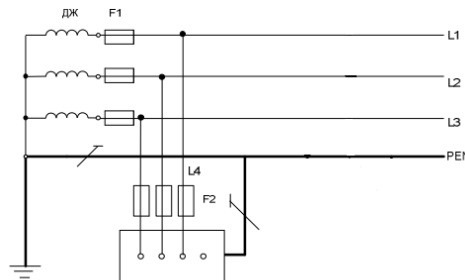
Захисне відімкнення — захист швидкої дії, що забезпечує автоматичне відімкнення електроустановки під час виникнення в ній небезпеки ураження людини струмом.

5.3.1 Розрахунок занулення

Розрахунок занулення складається з двох етапів: розрахунок на вимикаючу здатність та розрахунок максимальної напруги дотику у випадку замикання фази на корпус електроприймача [54].

Від трансформаторної підстанції (ТП) здійснюється живлення мережі напругою 380/220 В (трифазна з глухозаземленою нейтраллю, лінійна напруга $U_{ЛЛ} = 380$ В, фазна - $U_{\phi} = 220$ В) невеликого виробничого приміщення. До мережі необхідно підключити насосну станцію (Н), потужність якої $P_{НЛ} = 18,5$ кВт (рис. 5.1). Привод насосної станції здійснюється трифазним асинхронним електродвигуном мод. 4А160М2. Визначити поперечний переріз

проводів, номінальні струми плавких вставок запобіжників F_1 , F_2 , струм короткого замикання та визначити вимикаючу здатність занулення електродвигуна насосної станції, якщо загальне номінальне навантаження мережі складає $P_{н2}=58\text{кВт}$. Відстань від трансформаторної підстанції до місця підминання насосної станції (лінія 1) – $l_1 = 220\text{м}$. Відстань лінії 2 – $l_2 = 2,8\text{ м}$.



$L1, L2, L3$ – фазні провідники; F_1, F_2 – плавкі вставки; $L4$ – лінія 5.

Рисунок 5.1 – Розрахункова схема занулення

Розрахунок проводимо за допомогою [54].

За довідковими даними електродвигун 4A160M2 має номінальну потужність $P_n = 18,5\text{кВт}$. У цьому випадку розрахунковий струм насосної станції (лінія 4) буде дорівнювати:

$$I_{nn} = I_{л4} = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_A} = \frac{18500}{\sqrt{3} \cdot 380} = 28,14\text{А.}$$

За таблицею 1 додатка 3 беремо три одножильних проводи з алюмінію з поперечним перерізом $S_2 = 4\text{мм}^2$, які прокладені в одній трубі і для яких допустиме струмове навантаження дорівнює 32А (згідно з приміткою до табл. 1 додатка 3, наявність нульового проводу в розрахунок не береться).

Пусковий струм електродвигуна мод. 4A160M2 дорівнює $I_{ny} / I_{nn} = 7,5$ (довідкові дані), тоді:

$$I_{ny} = 7,5I_{nn} = 7,5 \cdot 28,14 = 211,1\text{ А.}$$

Максимальний короткочасний струм магістралі (лінія 1):

$$I_{\max} = I_{ny} = 211,1\text{ А.}$$

Розрахунковий струм плавкої вставки запобіжника F_1 :

$$I_{н1} = \frac{I_{\max}}{\alpha} = \frac{211,1}{2,5} = 84,42\text{ А.}$$

Здійснюємо вибір номінального струму плавкої вставки запобіжника F_1 з умов селективності, тобто:

$$10\text{А} < I_{н1} > 100\text{А.}$$

Вибираємо плавку вставку F_I з номінальним струмом $I_{н1}=125\text{А}$.

Для розв'язання задачі необхідно визначити поперечний переріз проводів лінії 1, яка прокладена у повітрі.

Визначаємо активний опір фазних проводів ліній 1 та 2, які виконані алюмінієвим проводом:

$$R_{\phi 1} = \rho \left(\frac{l_1}{S_{\phi 1}} + \frac{l_2}{S_{\phi 2}} \right) = 0,028 \cdot \left(\frac{220}{50} + \frac{2,8}{4} \right) = 0,143 \text{ Ом},$$

де ρ – питомий опір алюмінієвого провідника, $\rho = 0,028 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$;

$S_{\phi 2}$ – площа поперечного перерізу провідника, $S_{\phi 2}=4 \text{ мм}^2$.

Значення індуктивного опору повітряної лінії $X_I=0,60 \text{ Ом/км}$ та внутрішньої $X_2=0,3 \text{ Ом/км}$, у цьому випадку індуктивний опір петлі "фаза - нуль":

$$X_n = X_1 l_1 + X_2 l_2 = 0,6 \cdot 220 + 0,3 \cdot 2,8 = 0,132 \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

Враховуючи вимоги ПУЕ, тобто $P_{н2} \geq P_{\phi}$, вибираємо за табл.1 поперечний переріз нульових проводів ліній 1 та 2 відповідно: $S_{н1}=25 \text{ мм}^2$, $S_{н2}=2,5 \text{ мм}^2$, які теж виконані з алюмінію.

Активний опір нульових проводів дорівнює:

$$R_n = \rho \left(\frac{l_1}{S_{н1}} + \frac{l_2}{S_{н2}} \right) = 0,028 \cdot \left(\frac{220}{25} + \frac{2,8}{2,5} \right) = 0,278 \text{ Ом},$$

Комплексний опір петлі фаза-нуль :

$$Z_n = \sqrt{(R_n + R_{\phi})^2 + X_n^2} = \sqrt{(0,278 + 0,143)^2 + 0,132^2} = 0,445 \text{ Ом}.$$

Струм короткого замикання дорівнює:

$$I_k = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_m}{3} + Z_n} = \frac{20}{0,12 + 0,445} = 389,4 \text{ А}.$$

Визначаємо комплексний опір нульового проводу за виразом, враховуючи, що індуктивний опір нульового проводу приблизно дорівнює половині індуктивного опору петлі "фаза - нуль":

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2} = \sqrt{0,278^2 + 0,132^2} = 0,307 \text{ Ом}.$$

Напруга дотику буде дорівнювати:

$$U_D = I_k Z_n = 389,4 \cdot 0,307 = 116 \text{ В}.$$

Опір заземлення нейтралі трансформатора $R_0 = 4 \text{ Ом}$ прийнято за до датком Б у зв'язку з тим, що застосована живильна мережа напругою 380/220 В [54].

З метою спрощення розрахунків та підвищення безпеки можливо допустити, що $I_k = I_n$ [8,9], у цьому випадку має вигляд:

$$U_{Д} = I_k Z_n \frac{R_n}{R_0 + R_n} = 389,4 \cdot 0,307 \frac{0,307}{4 + 0,307} = 8,3 \text{ В.}$$

У цьому випадку напруга дотику не перевищує гранично допустимий рівень (20В), тобто умова безпеки виконується.

5.4. Виробничий шум та вібрація

Зважаючи на те, що у операторський, де не знаходяться основні джерела шуму не передбачаються.

Джерелом шуму при роботі обладнання є насоси, рівень шуму $L=100$ дБА.

Як індивідуальні засоби захисту від шуму відповідно використовують м'які прогумовані вкладиші, тампони з ебоніту чи гуми, які знижують ΔL на 18 – 20 дБА.

Для зменшення виробничого шуму передбачено проведення наступних заходів:

- своєчасне змащування всіх поверхонь, що труться;
- звукопоглинання, апарат покривають звукопоглинальним матеріалом;
- звукоізоляція, шумовипромінювальний об'єкт або декілька найбільш шумних об'єктів розташовують окремо, ізолювано від основного, менш шумного приміщення звукоізолюваною стіною або перегородкою;
- акустичною обробкою приміщення, передбачає вкривання стелі та верхньої частини стін звукопоглинальним матеріалом.

Після проведення заходів для зменшення виробничого шуму, його фактичні показники не перевищують 55дБА згідно ДСН 3.3.6.037-99.

Джерелом вібрації являються електродвигуни і обертаючі частини лінії. Вібрації виникають внаслідок неточності установки обертових частин, нещільного з'єднання корпусів обертових частин до фундаменту.

Зменшення вібрацій досягається наступними заходами:

- обладнання лінії встановлено на фундаменти, маса яких набагато перевищує масу встановленого обладнання;
- використання гумових прокладок в якості амортизаторів;
- проектування додаткових ребр жорсткості.

Сумарний час роботи в контактi з вiбрацiєю не перевищує 2/3 робочої змiни. Тривалiсть неперервної дiї вiбрацiї не перевищує 15-20 хв. При такому режимi обiдня перерва не менше 40 хвилин [54].

Рiвень технологiчної вiбрацiї у виробничому примiщеннi не перевищує 90дБ при частотi 4 Гц, що вiдповiдає ДСН 3.3.6.039-99.

Для захисту рук вiд впливу локальної вiбрацiї вiдповiдно до ГОСТ 12.4.002-74 прийнятi рукавицi чи рукавички, виготовленi з вiброзахисного матерiалу. Для захисту вiд вiбрацiї, переданої людинi через ноги, передбачене взуття на товстiй гумовiй пiдошви.

Для контролю рiвня шуму i вiбрацiї передбачений прилад ВШВ-003 i шумо-вiбро- замiрний комплекс ШВК-1 [54].

5.5. Засоби iндивiдуального захисту при роботi з УЗ обладнанням

Попередження несприятливої дiї ультразвуку та супроводжуючого його шуму на органiзм працюючих насамперед повинно зводитися до скорочення до мiнiмуму iнтенсивностi ультразвукових випромiнювань i часу дiї [54].

Найбiльш поширеними засобами iндивiдуального захисту при роботi з ультразвуком є протишуми i рукавички. Останнi доцiльно мати двошаровi: зовнi гумовi, а зсередини бавовнянi або вовнянi, вони краще поглинають коливання.

Для захисту органiв дихання вiд парiв розпалюваних нами речовин (розчини глицерину, масла) необхідно використовувати респiратори або ватно-марлеві пов'язки.

Для роботи в лабораторiї нам було рекомендовано носити спеціальний одяг (халат або комбiнезон).

5.6. Пожежобезпека

У примiщеннi, де працює iнженер може горiти: електропроводка, електрообладнання. На основi цього примiщення вiдноситься до категорiї В i класу зони П-Па. Це виробництво, в якому використовуються горючi речовини в якостi палива.

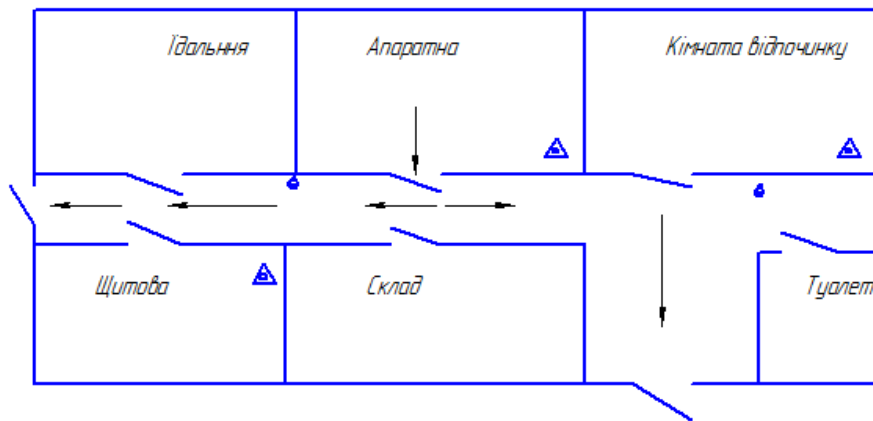
Органiзацiйнi заходи по попередженню пожежi передбачають: своєчасно проводити профiлактичнi огляди електроапаратури iз метою виявлення небезпечних пошкоджень; ретельно виконувати вимоги iнструкцiй по пожежнiй та електробезпецi; перед початком перевiряти справнiсть обладнання.

В робочому примiщеннi є два евакуовиходи - двостулковi дверi шириною 1,5 м, якi вiдкриваються назовнi, що вiдповiдає СНiП 2.09.02-85.

В якості засобів гасіння пожежі використовують вуглекислі вогнегасники ОУ-8 (1 шт.) і ящики з піском (1 шт.), котрі знаходяться на видних і загальнодоступних місцях [54].

На випадок виникнення аварійної ситуації обслуговуючий персонал забезпечений киснево - ізолюючими приладами типу МПА-4,5-30. З номінальним ЧЗД - 40хв.

Схема евакуації наведена на рисунку 5.2.



Рисунку 5.2 - План евакуації

Захист від блискавки - це обов'язкова частина будь-якої будівлі. Без системи захисту від блискавки (грозозахисту) будівля і відповідно, люди та майно, що знаходяться в ній, незахищені перед ударом стихії. Захист від блискавки потрібен для захисту від прямого удару блискавки в будинок, захисту від вторинних її проявів, таких як перенапруга[54].

5.7 Висновок

Враховані всі фактори та ризики виробництва, а також раціональне використання площі виробничих приміщень та місць розташування обладнання, вірну експлуатацію обладнання і організацію технологічних процесів, захист працюючих від впливу шкідливих умов праці, дотримання в виробничих приміщеннях, місцях розташування обладнання та на робочих місцях санітарно-гігієнічних норм та правил.

ВИСНОВОК

У магістерській дисертаційній роботі вирішено важливе науково-технічне завдання, яке полягає у розробці нової конструкції промислового осушувача повітря, який би за своїми характеристиками не був гірший за існуючі, але мав значно дешевше виконання. Після отримання результатів виконаних досліджень зроблено такі основні висновки:

1. Аналіз відомих конструкцій осушувачів повітря працюють тільки з вологим повітрям, а нам необхідно забезпечити не тільки осушення повітря, а й його очищення. Провівши аналіз відомих конструкцій циклону, визначено, що вони не зможуть забезпечити осушення повітря.

2. Проаналізовано математичну модель руху повітря в циклоні, що теоретично обґрунтовує геометричні розміри циклона.

3. Розроблено модель циклону за допомогою ПК SolidWorks Flow Simulation. Проаналізовано роботу обладнання при різних відсотках вмісту вологості у повітрі. Це підтверджує, що циклонні очищувачі не можуть забезпечити осушення повітря. Розроблено конструкцію, яка забезпечує одночасне осушення та очищення повітря. Нова конструкція промислового осушувача повітря, на основі застосування ультразвукових диспергаторів, значно зменшить витрати підприємств на обладнання.

Провівши експерименти, матеріали досліджень підтверджують запропоновану фізичну модель процесу ультразвукового осушення повітря та дозволяють сформулювати переваги подібного методу:

- досить малі габарити ультразвукового обладнання, тому воно може встановлюватися на широкому колі пристроїв відповідного очисного технологічного обладнання;
- порівняно малі витрати електроенергії для забезпечення ефективної та безперервної роботи у промислових приміщеннях;
- потребує багатьох допоміжних заходів для очищення фільтрів, відведення вологи, має досить великий термін служби.

4. Розроблено оригінальну конструкцію циклона з влаштованим ультразвуковим кавітатором може використовуватися в різних галузях промисловості. Для впровадження нового обладнання не знадобиться багато часу, оскільки пропонується циклон, який вже існує, але з покращеними характеристиками та новими можливостями.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. «Desiccant Technologies Group Україна» <http://pro-rh.info>.
2. «Dantherm» <http://www.dantherm.com.ua/ua/allinfo1.html>
3. «ARIACOM»
https://ariacom.ru/stati/princip_raboty_refrizheratornogo_osushitelya/
4. Ужов В. Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / Ужов В. Н. – М. : Химия, 1967. – 344 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 342-343.

5. Борьба с пылью на деревообрабатывающих предприятиях / О. Н. Русак, В. В. Милохов. – М. : Лесн. пром-сть, 1975 – 150 с.
6. Гастерштад И. Пневматический транспорт / Гастерштад И. – Л. : Изд-во Северо-Зап. обл. профбюро ВСНХ, 1927. – 84 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 82 – 83.
7. Иванцов И. О. Справочник проектировщика : справочник / Иванцов И. О. – М. : Стройиздат, 1978. – 420 с. : ил., табл.
8. Л. М. ДОРУНДЯК, дисерт. «Математична постановка і числовий аналіз задачі про рух повітряного потоку в циклоні».
9. Зайцев Н.О. Оборудование для очистки газов от пыли. Циклоны.
10. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха в системах вентиляции и кондиционирования : автореф. дисс. на соискание учен. степени д-ра техн. наук : спец. 05.17.08 "Процессы и аппараты химических технологий" / Пирумов А. И.; Моск. лесотехн. ин-т;.. – М., 1975. – 35 с.
11. Белоусов В. В. Теоретические основы процессов газоочистки : учебн. для вузов / Белоусов В. В. – М : Metallurgiya. – 1988. – 256 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 255.
12. Коузов П. А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. / Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрыбин Г. М. – Л. : Химия, 1982. – 256 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 254-255.
13. Спиваковский А. О. Автоматизация трубопроводного транспорта в горной промышленности / Спиваковский А. О., Смолдырев А. Е., Зубакин Ю. С. – М. : Недра, 1972. – 184 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 180-183.
14. Ужов В. Н. Подготовка промышленных газов к очистке / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М. : Химия, 1975. – 212 с.
15. Пилипчук М. І. Основи наукових досліджень / Пилипчук М. І., Григор'єв А. С., Шостак В. В. – К. : Знання, 2007. – 272 с. : іл., табл. – Бібліогр.: с. 271.
16. Пирумов А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации / под ред. Н. Я. Фабриканта. – М. : Госстройиздат, 1961. – 121 с.
17. Пирумов А. И. Обеспыливание воздуха / Пирумов А. И. – М : Стройиздат, 1981. – 296 с.
18. Кузнецов В. С. Пневматический транспорт на деревообрабатывающих предприятиях. Внешние пневмотранспортные установки : учебн. пособие / В. С. Кузнецов, С. В. Денисов. – Братск : БрГУ, 2007. – 67 с.

19. Ковальов В.А. Структура циркуляційних течій в'язкої нестисливої рідини поблизу радіальних перегородок // Наукові Вісті НТУУ «КПІ», 2013, №3(24), с. 45-49.
20. Ковалев В.А., Яхно О.М. Гидродинамические особенности циркуляционных потоков в замкнутых объемах // монографія, Донецк, 2014. – 324 с.
21. Erik Wassen. Entwicklung paralleler Algorithmen zur numerischen Simulation von Gas – Partikel – Strömungen unter Berücksichtigung von Partikel : Kollisionen Dissertation / Erik Wassen , Partikel. – Chemnitz. 1998. – 56 p.
22. Fredriksson C. Exploratory Experimental and Theoretical Studies of Cyclone Gasification of Wood Powder : Doctoral thesis / Fredriksson C. , Lulea university of technology. – Sweden. 1999. – p. 169.
23. Банит М. И. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов / Банит М. И., Мальгин А. Д. – М. : Стройиздат, 1979. – 351 с.
24. Ярош Я. Д. Підвищення ефективності пиловловлення батарейних циклонів за рахунок застосування елементів з жалюзійними решітками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08 "Процеси та обладнання хімічної технології" / Ярош Ярослав Дмитрович ; НУ "ЛП" – Тернопіль, 2003. – 16 с.
25. Determining the best modeling assumptions for cyclones and swirl tubes by CFD and LDA / W. Peng, P. Boot, A. Udding, A. C. Hoffmann and other. // International Congress for particle Technology PARTEC 2001 (Germany March 2001.). – Nuremberg, 2001. – p. 27-29.
26. Белоусов В. В. Теоретические основы процессов газоочистки : учебн. для вузов / Белоусов В. В. – М : Metallurgiya. – 1988. – 256 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 255.
27. Коузов П. А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. / Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрыбин Г. М. – Л. : Химия, 1982. – 256 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 254-255.
28. Білуха М. Т. Методологія наукових досліджень : підручник / Білуха М. Т. – К. : АБУ, 2002. – 480 с.
29. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей для очистки вентиляционного воздуха. – Л. : ВНИИОТ ВЦСПС, 1967. – 103 с.
30. Ляшеник А. В. Обґрунтування конструкції циклона для очищення повітря на підприємствах деревообробної галузі / А. В. Ляшеник, Л. О. Тисовський, Л. М.

Дорундяк, Ю. Р. Дадак // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.9. – С. 119-125.

31. Батлук В. А. Наукові основи створення високоефективного пиловловлюючого обладнання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.05.02 "Машина для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій" / Батлук Вікторія Арсеніївна; НУ "Львівська політехніка". – Львів : НУ "Львівська політехніка", 2001. – 40 с.
32. Василевский М. В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография / М. В. Василевский □ Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. □ 258 с.
33. Карсканов С. А. Прямое численное моделирование трехмерных течений газа в плоском канале с резким расширением : автореф. дисс. на соискание учен. степени кандидата физико-математических наук : спец. 01.02.05 – "Механика жидкости, газа и плазмы" / Карсканов Сергей Андреевич. – Ижевск, 2009. – 16 с.
34. Мазус М. Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей / Мазус М. Г., Мальгин А. Д., Моргулис М. Л. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 236-239.
35. Каспрук В. Б. Підвищення ефективності пиловловлювання в апаратах із зустрічними закрученими потоками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.13 "Машина та апарати хімічних виробництв" / Каспрук Володимир Богданович ; ДУ "Львівська політехніка" – Львів, 1998. – 17 с.
36. Климаш Р. Р. Дослідження поля швидкостей запиленого потоку повітря в трубопроводі децентралізованої аспіраційної системи / Р. Р. Климаш, В. В. Шостак, Л. О. Тисовський, Л. М. Дорундяк, А. В. Ляшеник // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.2. – С. 336-341.
37. Frank Th. Lagrangian Prediction of Disperse Gas – Particle Flow in Cyclone Separators / Frank Th., Wassen E., Q. Yu. // Paper [Third International Conference on Multiphase Flow – ICMF'98], (Lyon, France, June 8-12, 1998). – No. 217. – p. 1-8.
38. Lecoffre Y. A new concept in liquid-liquid separation / Y. Lecoffre, Y. Lec. – La Défense, Paris. 1999. – 252. p.
39. Ляшеник А. В. Автоматична система керування фільтрувальною повітроочищувальною станцією / А. В. Ляшеник, Л. О. Тисовський,

- Л. М. Дорундяк, Ю. Р. Дадак // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.6. – С. 96-103.
40. Batluk V. Matematic model of the process of dust catching in an apparatus with a movable separator / V. Batluk, V. Batluk, M. Basov, L. Dorundyak // *Econtchmod an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes*. – Lublin-Lviv-Cracow, 2012. – Vol. 1. – N 1.09-12. – P. 13-16.
41. Метода по старапу
42. «Визначення гідравлічного опору циклонів засобами комп'ютерного моделювання *solid works flow simulation*» доц. Р.І. Гаврилів, доц. В.В. Майструк, О.О. Тимура, О.М. Кухар.
43. Дорундяк, Л.М. (2015) Обґрунтування параметрів циклона транспортних пневмосистем деревообробних підприємств [Текст] : дис. канд. техн. наук : Держ. ВНЗ Нац. лісотехн. ун-т України. – Львів. - 173 с.
44. Патент України № 92987, Пристрій для кавітаційної обробки рідини /Луговський О.Ф., Гришко І.А., Мовчанюк А.В. - Опубл. 27.12.2010, Бюл. №24
45. Заявка на винахід України № а 201702783, Ультразвуковий розпилювач / Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Ткалич В.В., Орешніков О.В., Гришко І.А., Фесіч В.П., Зілінський А.І.- 24.03.2017
46. Луговской, А.Ф. (2017) “Повышение производительности ультразвуковых распылителей жидкости” - *Mechanics and Advanced Technologies*, 2 (80), с. 113-122.
47. Луговской, А.Ф. (2007) Ультразвуковая кавитация в современных технологиях: монография / А.Ф. Луговской, Н.В. Чухраев. – К. 2007. – 244 с. – ISBN 966-594-927-6.
48. (1979) Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия. – 400 с.
49. Хмелев, В.Н. (2010) Ультразвуковое распыление жидкостей: монография. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 250 с.
50. Dalmoro, A., Barba, AA., Lamberti, G., d'Amore, M., 2012. Intensifying the microencapsulation process: ultrasonic atomization as an innovative approach. *Eur. J. Phann. Biophann.* 80, 471- 477. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpb.2012.01.006>.
51. Forde, G., Coomes, A., Gillam, Freitas, S., Merkle, H., Gander, B.. 2004. Ultrasonic atomisation into reduced pressure atmosphere – envisaging aseptic spray – drying for microencapsulation. *J. Control. Release* 95, 185-195. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconrel.2003.11.005>.

52. Удосконалення промислових систем осушення повітря шляхом застосування ультразвукових коливань/ А.Ф. Луговський¹, В.А. Ковальов¹, В.П. Фесич², Є. Ю. Дудка¹
53. Л. М. ДОРУНДЯК, асп., Є. М. ЛЮТИЙ, д-р. техн. наук, проф., Л. О. ТИСОВСЬКИЙ, канд. фіз.-мат. наук, доц., А. В. ЛЯШЕНИК, канд. техн. наук, доц., Математична постановка і числовий аналіз задачі про рух повітряного потоку в циклоні
54. М.С. Петрова, С.В. Петров, С.Н. Вольхин «Охрана труда на производстве»
55. Є.М. Лютий, Л.М. Дорундяк, Нові підходи до моделювання процесів очищення на деревообробних підприємства